

PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO OPTIMIZADO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LOS
CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA**

**PRESENTADO POR:
CAMILO ANDRÉS SALCEDO BALLESTEROS**

**ASESOR:
JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
DICIEMBRE DE 2012**

A Dios,

A mis papás y a mi hermanito por darme siempre todo su apoyo incondicional y ánimo, y hacerme saber en cada momento que ellos siempre estarán conmigo sin importar las circunstancias,

A todos mis amigos y mi novia, especialmente a Diana, Melissa, Carlos, Vannessa y Jessica por ser un gran apoyo durante la carrera, y por todos esos momentos compartidos,

Al grupo CIE-AGUA por la colaboración brindada durante el semestre,

A Juan Saldarriaga por su asesoría para lograr el desarrollo de este Proyecto de Grado y por los conocimientos brindados.

¡Gracias!

Tabla de Contenidos

TABLA DE CONTENIDOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE GRÁFICAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Antecedentes.....	3
2.1.1 “Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano” - Ivonne Navarro Pérez – 2009	3
2.1.2 “Criterios de Diseño de Tuberías Fluyendo Parcialmente Llenas: Velocidad Mínima, Esfuerzo Cortante Mínimo y Número de Froude Cuasicrítico” - Freddy Leonardo Ovalle Bueno – 2011	4
2.1.3 “Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano Usando el Concepto de Potencia Unitaria” - Daniel Andrés López Sabogal – 2011.....	5
2.1.4 “Diseño Hidráulico Optimizado de Redes de Alcantarillado Usando los Conceptos de Potencia Unitaria y Pendiente Lógica” - Diego Antonio Copete Rivera – 2012	7
2.2 Redes de Drenaje Urbano	8
2.2.1 Significado e Importancia del Drenaje Urbano.....	8
2.2.2 Tipos de Sistemas de Drenaje Urbano	9
2.2.3 Componentes de un Sistema de Drenaje Urbano.....	11
2.3 Diseño de Redes de Drenaje Urbano	12
2.3.1 Suposiciones de Diseño: Flujo Uniforme	13
2.3.2 Ecuaciones de Diseño	14
2.3.3 Restricciones de Diseño	18

2.3.4	Manejo de Interferencias en Redes de Alcantarillado	20
2.4	Criterios de Confiabilidad.....	23
2.4.1	Potencia Unitaria	23
2.4.2	Índice de Resiliencia.....	24
2.5	Metodologías de Optimización.....	25
2.5.1	“Optimal Design of a Sewer Line Using Linear Programming” – Prabhata Swamee	25
3.	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO OPTIMIZADO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LA RESILIENCIA Y LA POTENCIA UNITARIA	34
3.1	Programa CIE-AGUA.....	34
3.1.1	Selección del Diámetro y Pendiente de Diseño para un Tramo	34
3.1.2	Formación de Tramos a Través de la Búsqueda Exhaustiva	38
3.2	Costos Involucrados en el Diseño de Alcantarillados.....	39
3.2.1	Costos de la Tubería	39
3.2.2	Costos de Excavación	42
3.2.3	Función de Costo Total.....	52
3.3	Índice de Resiliencia en Redes de Alcantarillado.....	53
4.	RESULTADOS.....	56
4.1	Resultados de las Ciudades Hipotéticas.....	56
4.1.1	Ciudad 1: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	56
4.1.2	Ciudad 2: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.1%.....	61
4.1.3	Ciudad 3: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 1%.....	64
4.1.4	Ciudad 4: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	67
4.1.5	Ciudad 5: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.2%.....	70
4.1.6	Ciudad 6: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	73
4.1.7	Ciudad 7: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.2%.....	76
4.1.8	Ciudad 8: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	79
4.1.9	Ciudad 9: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.3%.....	82
4.1.10	Ciudad 10: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 1.0%.....	85
4.1.11	Ciudad 11: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	88

4.1.12	Ciudad 12: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 0.2%.....	91
4.1.13	Ciudad 13: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	94
4.1.14	Ciudad 14: Red de 10 Tramos en Topografía Plana.....	97
4.1.15	Ciudad 15: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 0.2%.....	100
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	103
5.1	Análisis de las Ciudades Hipotéticas.....	103
5.1.1	Topografía de las Ciudades.....	103
5.1.2	Costos Totales.....	104
5.1.3	Relación entre el Índice de Resiliencia y la Potencia Unitaria.....	104
5.1.4	Relación entre el Índice de Resiliencia y los costos totales de la red.....	105
5.1.5	Relación entre la Potencia Unitaria y los costos totales de la red.....	106
5.2	Análisis de Sensibilidad.....	107
5.2.1	Diseño Ciudad 1 Con Costos de Tubería igual a Cero.....	107
5.2.2	Diseño Ciudad 1 con Costos de Excavación igual a Cero.....	110
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	117
8.	ANEXOS.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Inundación en Bosa durante la Ola Invernal del 2011. Tomado de Eltiempo.com.....	9
Figura 2.2. Esquema de un Sistema Combinado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009)	10
Figura 2.3. Esquema de un Sistema Separado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009)	11
Figura 2.4. Flujo Uniforme en un Canal Abierto	13
Figura 2.5. Sección transversal Tubería Fluyendo Parcialmente Llena. Tomado y Modificado de (Copete Rivera, 2012).....	14
Figura 2.6. Línea de Drenaje. Tomado de (Swamee, 2001)	26
Figura 2.7. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Swamee. Tomado de (Swamee, 2001)..	32
Figura 2.8. Segunda parte del Algoritmo de Swamee. Tomado de (Swamee, 2001).....	33
Figura 3.1. Diagrama de Flujo Selección Diámetro y Pendiente de un Tramo. Tomado y Adaptado de (CIACUA, 2012).....	36
Figura 3.2. Continuación Diagrama de Flujo Selección Diámetro y Pendiente de un Tramo. Tomado y Adaptado de (CIACUA, 2012)	37
Figura 3.3. Ejemplo de Estructura de Datos en Árbol. Tomado y Modificado de (CIACUA, 2012)	38
Figura 3.4. Esquema de un tramo de tubería.....	43
Figura 3.5. Volumen de Tierra asociado a la instalación de la tubería.	44
Figura 3.6. Ancho de Zanja según Manual Técnico para Alcantarillados NOVAFORT y NOVALOC. Tomado de (PAVCO, 2011).....	44
Figura 3.7. Entibado tipo ED-1. Tomado de (EAAB, 2003)	48
Figura 3.8. Esquema del Entibado de una Zanja	49
Figura 3.9. Esquema del Concepto de Pendiente Máxima.....	54
Figura 4.1. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1	58
Figura 4.2. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 2	61
Figura 4.3. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 3	64
Figura 4.4. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 4	67
Figura 4.5. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 5	70
Figura 4.6. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 6	73
Figura 4.7. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 7	76
Figura 4.8. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 8	79
Figura 4.9. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 9	82
Figura 4.10. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 10	85
Figura 4.11. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 11	88
Figura 4.12. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 12	91

Figura 4.13. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 13	94
Figura 4.14. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 14	97
Figura 4.15. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 15	100
Figura 5.1. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1 con Costos de Tubería iguales a Cero.....	107
Figura 5.2. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1 con Costos de Excavación iguales a Cero.....	111

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1. Curva de Costos para Tuberías de Alcantarillado en (\$COP)	41
Gráfica 3.2. Curvas de Costo para la Cámara de Inspección.....	50
Gráfica 4.1. Relación entre Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1	59
Gráfica 4.2. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1	60
Gráfica 4.3. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1	60
Gráfica 4.4. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 2	62
Gráfica 4.5. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 2	63
Gráfica 4.6. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 2	63
Gráfica 4.7. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 3	65
Gráfica 4.8. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 3	66
Gráfica 4.9. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 3	66
Gráfica 4.10. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 4	68
Gráfica 4.11. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 4	69
Gráfica 4.12. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 4	69
Gráfica 4.13. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 5	71
Gráfica 4.14. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 5	72
Gráfica 4.15. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 5	72
Gráfica 4.16. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 6	74
Gráfica 4.17. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 6	75
Gráfica 4.18. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 6	75

Gráfica 4.19. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 7	77
Gráfica 4.20. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 7	78
Gráfica 4.21. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 7	78
Gráfica 4.22. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 8	80
Gráfica 4.23. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 8	81
Gráfica 4.24. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 8	81
Gráfica 4.25. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 9	83
Gráfica 4.26. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 9	84
Gráfica 4.27. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 9	84
Gráfica 4.28. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 10	86
Gráfica 4.29. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 10	87
Gráfica 4.30. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 10	87
Gráfica 4.31. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 11	89
Gráfica 4.32. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 11	90
Gráfica 4.33. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 11	90
Gráfica 4.34. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12	92
Gráfica 4.35. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12	93
Gráfica 4.36. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12	93
Gráfica 4.37. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 13	95

Gráfica 4.38. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 13	96
Gráfica 4.39. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 13	96
Gráfica 4.40. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 14	98
Gráfica 4.41. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 14	99
Gráfica 4.42. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 14	99
Gráfica 4.43. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 15	101
Gráfica 4.44. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 15	102
Gráfica 4.45. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 15	102
Gráfica 5.1. Relación entre la Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería.....	109
Gráfica 5.2. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería.....	109
Gráfica 5.3. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería.....	110
Gráfica 5.4. Relación entre la Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación	112
Gráfica 5.5. Relación entre los Costos Totales y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación	113
Gráfica 5.6. Relación entre los Costos Totales y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen de propiedades geométricas del alcantarillado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009) y (Copete Rivera, 2012)	15
Tabla 2.2. Porcentajes de Llenado Máximos según el diámetro de la tubería. Tomado de RAS2000	19
Tabla 2.3. Distancias mínimas a redes de distribución de agua potable para alcantarillados sanitarios. Tomado de (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).....	22
Tabla 2.4. Distancias mínimas a redes de distribución de agua potable para alcantarillados pluviales. Tomado de (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)	22
Tabla 2.5. Ancho de la Zanja según el diámetro de la tubería. Tomado y Modificado de (Swamee, 2001)	27
Tabla 2.6. Estimación de la relación de llenado según Swamee. Tomado y modificado de (Swamee, 2001)	28
Tabla 2.7. Velocidad de Socavación según el material de la tubería. Obtenido y Modificado de (Swamee, 2001)	30
Tabla 3.1. Lista de Diámetros comerciales utilizados.....	35
Tabla 3.2. Precios en Pesos Colombianos (sin IVA) por metro lineal de Tubería NOVAFORT. Tomado de (PAVCO, 2012)	40
Tabla 3.3. Precios en Pesos Colombianos (sin IVA) por metro lineal de Tubería NOVALOC. Tomado de (PAVCO, 2012).....	40
Tabla 3.4. Costos de Excavación para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012).....	42
Tabla 3.5. Costo de Relleno para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012).....	47
Tabla 3.6. Costo de Entibado para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012).....	48
Tabla 3.7. Ecuaciones y Coeficientes de Determinación obtenidos con la Regresión Polinómica	51
Tabla 3.8. Variación del IPC desde Mayo de 2011 hasta Octubre de 2012. Tomado de (DANE, 2012)	51
Tabla 3.9. Resumen de las Ecuaciones Propuestas	52
Tabla 4.1. Listado de Diámetros Comerciales Disponibles.....	56
Tabla 4.2. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 1	57
Tabla 4.3. Resultados Totales para la Ciudad 1.....	58
Tabla 4.4. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 1	59
Tabla 4.5. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 2	61
Tabla 4.6. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 2	62
Tabla 4.7. Resultados Totales para la Ciudad 2.....	62
Tabla 4.8. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 3	64
Tabla 4.9. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 3	65
Tabla 4.10. Resultados Totales para la Ciudad 3.....	65

Tabla 4.11. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 4	67
Tabla 4.12. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 4	68
Tabla 4.13. Resultados Totales para la Ciudad 4.....	68
Tabla 4.14. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 5	70
Tabla 4.15. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 5	71
Tabla 4.16. Resultados Totales para la Ciudad 5.....	71
Tabla 4.17. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 6	73
Tabla 4.18. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 6	74
Tabla 4.19. Resultados Totales para la Ciudad 6.....	74
Tabla 4.20. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 7	76
Tabla 4.21. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 7	77
Tabla 4.22. Resultados Totales para la Ciudad 7.....	77
Tabla 4.23. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 8	79
Tabla 4.24. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 8	80
Tabla 4.25. Resultados Totales para la Ciudad 8.....	80
Tabla 4.26. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 9	82
Tabla 4.27. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 9	83
Tabla 4.28. Resultados Totales para la Ciudad 9.....	83
Tabla 4.29. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 10	85
Tabla 4.30. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 10	86
Tabla 4.31. Resultados Totales para la Ciudad 10.....	86
Tabla 4.32. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 11	88
Tabla 4.33. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 11	89
Tabla 4.34. Resultados Totales para la Ciudad 11.....	89
Tabla 4.35. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 12	91
Tabla 4.36. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 12	92
Tabla 4.37. Resultados Totales para la Ciudad 12.....	92
Tabla 4.38. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 13	94
Tabla 4.39. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 13	95
Tabla 4.40. Resultados Totales para la Ciudad 13.....	95
Tabla 4.41. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 14	97
Tabla 4.42. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 14	98
Tabla 4.43. Resultados Totales para la Ciudad 14.....	98
Tabla 4.44. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 15	100
Tabla 4.45. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 15	101
Tabla 4.46. Resultados Totales para la Ciudad 15.....	101
Tabla 5.1. Resumen de los R^2 obtenidos para cada ciudad para la relación entre Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia	104

Tabla 5.2. Resumen de Coeficientes de Determinación según la Ciudad para la Relación de Índice de Resiliencia con Costos Totales de la red	105
Tabla 5.3. Variación del R^2 para la relación entre Costos Totales y Potencia Unitaria ...	106
Tabla 5.4. Resultados de Diseño para la Ciudad 1 Sin Incluir Costos de Tubería.....	108
Tabla 5.5. Resultados Totales para la Ciudad 1 Excluyendo los Costos de la Tubería ..	108
Tabla 5.6. Resultados de Diseño para la Ciudad 1 Sin Incluir Costos de Excavación....	111
Tabla 5.7. Resultados Totales para la Ciudad 1 Excluyendo los Costos de la Excavación	111

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Desde la época de antiguas e imponentes civilizaciones como lo fue la mesopotámica, o la griega, la necesidad del ser humano de controlar su medio ambiente ha existido, dándole así origen a los primeros sistemas de alcantarillado artificiales, llevando esto a evidenciar que el drenaje es un concepto que nació muchos años antes de Cristo (Butler & Davies, 2009). Los romanos, reconocidos por sus grandes acueductos construidos para llevar agua a la ciudad, también desarrollaron sistemas de drenaje, dentro de los cuales la más conocida es la *Cloaca Máxima*, construida para drenar el Foro Romano y usada aun en la actualidad (Butler & Davies, 2009).

Dado que hasta antes de 1600 no se relacionaba al drenaje con las aguas residuales, el diccionario de Oxford da la siguiente definición al drenaje: “Un curso artificial de agua encargada de drenar tierras pantanosas y llevar el agua hasta un río o hacia el mar” (Butler & Davies, 2009). Como se puede ver, esta definición en la actualidad ha evolucionado y cambiado dados los diversos tipos de sistemas de alcantarillado existente, así como el tipo de agua que estos transportan.

Ahora bien, luego de haber conocido un poco de historia del drenaje urbano, se puede comprender su importancia para todas las formas de urbanización existentes a nivel mundial. Dado que este concepto puede llegar a ser discriminante según la lejanía de los asentamientos humanos y sus recursos, se desea proveer un sistema que sea óptimo tanto en su costo, así como en su funcionamiento, no solo para dichas comunidades sino para las grandes ciudades también. Es por esta razón que se desea investigar sobre metodologías que lleven a lograr un diseño del sistema de drenaje urbano que no solo sea el más económico posible, sino que también garantice un adecuado funcionamiento hidráulico, ya que así se puede mejorar la calidad de vida de toda una sociedad.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, en el presente proyecto de grado se utilizarán metodologías ya propuestas por otros estudiantes, así como adelantos realizados en el tema por parte del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA, para evaluar diferentes criterios que permitan llegar al diseño optimizado de alcantarillados. Para esto, en primer lugar se proponen unas funciones de costo asociadas con la excavación del sistema, componente que no había sido adecuadamente analizado previamente. Asimismo, se busca extender un criterio de confiabilidad que fue originalmente propuesto por Ezio Todini para el diseño de Redes de

Distribución de Agua Potable a los sistemas de alcantarillado y así analizar su pertinencia en la orientación de la consecución del diseño óptimo. Finalmente, se utilizarán las herramientas mencionadas previamente para analizar 15 ciudades hipotéticas, las cuales con sus resultados ayudarán a analizar y concluir sobre la efectividad de la metodología empleada en el momento de lograr el diseño óptimo de la red.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar una cantidad determinada de redes de alcantarillado diferentes en donde varíen algunas de sus características como la topografía, caudales, pendientes y longitudes, verificando que todas funcionen adecuadamente desde el punto de vista hidráulico, y así posteriormente seleccionar las de menor costo con el fin de establecer criterios de confiabilidad como lo es el Índice de Resiliencia y la Potencia Unitaria relaciones entre ellos que permitan establecer criterios para realizar el diseño óptimo del sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar las ecuaciones propuestas por (Navarro Pérez, 2009) para el cálculo de los costos asociados con el diseño de los sistemas de alcantarillados.
- Identificar los componentes de costo más relevantes involucrados en el diseño y construcción del sistema de alcantarillado para proponer una nueva función que los incluya.
- Analizar la sensibilidad que presenta la función de costos asociada con el diseño de alcantarillados frente a cambios en los costos de la tubería y en los de excavación para así poder obtener indicios con el fin de enfocar el procedimiento de diseño.
- Utilizar el Programa desarrollado por el CIE-AGUAS para realizar el diseño de las diferentes redes a analizar realizándole algunas modificaciones asociadas a las funciones de costo.
- Realizar una crítica a algoritmos de optimización planteados previamente alrededor del mundo.
- Proponer una expresión que explique el Índice de Resiliencia aplicado a una red de alcantarillado.
- Validar la expresión propuesta para el Índice de Resiliencia verificando su comportamiento en las redes diseñadas.
- Identificar relaciones entre los costos y los criterios de confiabilidad, como el Índice de Resiliencia y la Potencia Unitaria, que permitan encontrar diseños óptimos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA se ha venido trabajando continuamente en el tema referente a la optimización en el diseño de alcantarillados. A continuación se mencionarán los aportes y conclusiones más relevantes de cada uno de los proyectos de grado que han sido realizados previamente en el CIACUA, y que sirvieron de punto de partida para la realización del presente proyecto.

2.1.1 “Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano” - Ivonne Navarro Pérez – 2009

Para analizar los costos asociados con el diseño de sistemas de alcantarillado, (Navarro Pérez, 2009) utilizó tres ecuaciones, las cuales fueron utilizadas por López y Copete en sus respectivos proyectos como se verá más adelante. La primera de estas, la Ecuación 2.1, corresponde a la utilizada por (De Oro Vergara, 2008), a través de la cual se determinaron las curvas de costos para diferentes tecnologías de rehabilitación de alcantarillados (Copete Rivera, 2012). La ecuación en mención fue obtenida por De Oro basándose en un estudio realizado por el *Trenchless Technology Center* de Louisiana Tech University, utilizando el caso de estudio correspondiente al de Zanja con PVC, y finalmente siendo actualizada a su equivalente monetario del 2008 haciendo uso del IPC (Índice de Precios al Consumidor) publicado en el DANE para ese año.

$$C = 693.62 * d^{1.088} * H^{0.303} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

- C = Costo por metro lineal de tubería [COP/m]
- d = Diámetro de la tubería en milímetros [mm]
- H = Profundidad de la Instalación en metros [m]

Por su parte, la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.3 fueron tomadas del “Estudio de Estructuración y Análisis de Información de Inversiones de los Prestadores de Acueducto y Alcantarillado”, documento que fue desarrollado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) con el objetivo de estructurar información relacionada con la inversión destinada a infraestructura en acueductos y alcantarillados, desarrollando así funciones de costo para los componentes más importantes de dichos servicios (Copete Rivera, 2012). La información con la cual se realizó dicho estudio era

proveniente de bases de datos del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), del Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y de empresas encargadas de prestar el servicio (Navarro Pérez, 2009).

$$C = 9579.31 * k * d^{0.5737} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

C = Costo por metro lineal de tubería a Mayo del 2009 [COP/m]

d = Diámetro de la tubería en milímetros [mm]

k = Factor de conversión de pesos de Diciembre de 2007 a Mayo de 2009. Este fue calculado como: $(1+IPC_{2008}) * (1+IPC_{06/2009}) = 1.32$

$$C = 1163.77 * k * V^{1.31} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

C = Costo de excavación mecánica en material común a Mayo de 2009 [COP]

V = Volumen de excavación por tubería en metros cúbicos. [m³]

k = Factor de conversión de pesos de Diciembre de 2007 a Mayo de 2009. Este fue calculado como: $(1+IPC_{2008}) * (1+IPC_{06/2009}) = 1.32$

Finalmente, al combinar las dos ecuaciones mostradas previamente (Ecuaciones 2.2 y 2.3), se consolidó una ecuación para poder analizar el costo total de un tramo de tubería, resultando así la Ecuación 2.4.

$$C_{TOTAL} = k(9579.31 * d^{0.5737} + 1163.77 * V^{1.31}) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

2.1.2 “Criterios de Diseño de Tuberías Fluyendo Parcialmente Llenas: Velocidad Mínima, Esfuerzo Cortante Mínimo y Número de Froude Cuasicrítico” - Freddy Leonardo Ovalle Bueno - 2011

Ovalle desarrolló su Proyecto de Grado como una respuesta a la crítica realizada por el Ingeniero Rafael Paredes al Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS respecto al diseño de tuberías fluyendo parcialmente llenas en los sistemas de alcantarillado.

La crítica hecha por Paredes consiste en no permitir la ocurrencia del Flujo Cuasicrítico para cualquier situación de llenado en un diámetro específico. Se puede ver que con esta crítica se está buscando evitar la ocurrencia de Flujo Cuasicrítico en todos los diseños, sin

realizar ninguna excepción al considerarse igual de perjudicial en todas las situaciones, razón por la cual se sugiere la abolición de las pendientes pequeñas en el diseño de alcantarillados (Ovalle Bueno, 2010).

Esta prohibición tiene principalmente dos razones: El primero de ellos, es que las pendientes pequeñas incumplen con la restricción del flujo cuasicrítico, y la segunda de ellas es que cuando los diseñadores intentan disminuir mucho más la pendiente de la tubería logran que se incumplan las condiciones de auto-limpieza, las cuales se refieren a la velocidad mínima y al esfuerzo cortante mínimo. La consecuencia que tendría en los diseños esta abolición sería un aumento en los costos de excavación, ya que para evitar las pendientes pequeñas los diseñadores sobredimensionan los diseños aumentando la inclinación de este (Ovalle Bueno, 2010).

Ovalle desarrolló una metodología basada en las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White con el fin de ofrecer al diseñador soluciones que no aumentaran el costo constructivo. Luego de realizar esto, el autor llegó a las conclusiones mostradas a continuación:

- Al abolir, para cualquier situación de llenado, un determinado rango de pendientes se están prohibiendo diseños funcionales y que pueden llegar a ser más económicos que los obtenidos sin esta restricción.
- Se debe restringir la combinación de grandes profundidades de flujo con la presencia de flujo cuasicrítico ya que la tubería puede presurizarse. Por esta razón, se propuso así una relación de llenado máxima (y_n/d) del 70% cuando este tipo de flujo se presente.
- El flujo cuasicrítico es inofensivo siempre y cuando no se tengan relaciones de llenado superiores al 70%.

2.1.3 “Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano Usando el Concepto de Potencia Unitaria” - Daniel Andrés López Sabogal - 2011

López, en su proyecto de grado, buscó desarrollar una metodología para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano involucrando aspectos económicos y técnicos garantizando un funcionamiento adecuado y costos constructivos bajos. Para este fin, desarrolló dos conceptos que serán fundamentales en el presente proyecto, y se refiere a la potencia unitaria y a la pendiente lógica.

En primer lugar, la potencia unitaria es un índice de confiabilidad que ayuda al sistema a reducir las probabilidades de que se presente algún problema que afecte a la infraestructura, o a la comunidad circundante (López Sabogal, 2011). En segundo lugar, el concepto de pendiente lógica se obtiene mediante la discretización de la pendiente en múltiplos de 0.001, y se le atribuye esta característica a aquella pendiente que permite que el valor del diámetro de la tubería se reduzca al inmediatamente anterior variando su relación de llenado (López Sabogal, 2011).

López desarrolló una metodología exhaustiva para el diseño optimizado de las redes de drenaje urbano, en donde se tiene una gran cantidad de alternativas, número que está dado por la Ecuación 2.5.

$$NTA = \prod_{i=1}^n P_i$$

Ecuación 2.5

Donde:

NTA = Número Total de Alternativas [-]

Pi = Número de Pendientes lógicas en el tramo i [-]

n = Número total de Tramos en la red [-]

Para realizar la evaluación de costos, López utilizó las ecuaciones empleadas por Ivonne Navarro, y que se mostraron anteriormente en este capítulo. Finalmente, luego de aplicar su metodología propuesta, el autor llegó a las conclusiones mostradas a continuación:

- Existe una relación inversa entre los costos de la red y la potencia unitaria, criterio que puede ser utilizado para la optimización de los diseños.
- Discretizar la pendiente mejora el manejo de recursos, dejando de estar esta solo bajo la percepción del diseñador.
- Entre mayor sea la potencia unitaria de la red, se presentarán ramas más uniformes.
- Para obtener el diseño optimizado de la red se debe maximizar la potencia unitaria de esta.

2.1.4 “Diseño Hidráulico Optimizado de Redes de Alcantarillado Usando los Conceptos de Potencia Unitaria y Pendiente Lógica” - Diego Antonio Copete Rivera - 2012

Copete, en su proyecto de grado, diseñó un gran número de redes empleando la metodología propuesta por López revisando que todas ellas cumplieran con los requerimientos exigidos por el RAS, para así poder establecer relaciones entre los costos constructivos y los criterios de confiabilidad que ayudaran a la selección del diseño óptimo desde el punto de vista económico.

Para la implementación de la metodología, Copete utilizó las Ecuaciones 2.2 y 2.3, propuestas por Navarro, combinándolas para formar una expresión que describiera los costos totales de la red como se muestra en la Ecuación 2.6.

$$C_{TOTAL} = (9579.31 * 1.32 * (20.54d^{0.5737})) * L + 1163.77 * 1.32 * (\sin(\text{atan}(s)) * L * \cos(a \tan(s)) * L * ((d * 0.0254) + 1))^{1.31} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Adicionalmente, Copete implementó el criterio de Ipai-Wu, el cual es aplicado en el diseño de tuberías en serie y redes de distribución, a Tuberías Fluyendo Parcialmente Llenas. Dada la suposición de Flujo uniforme bajo la cual se diseñan los sistemas de alcantarillado, se tiene que el LGH es paralelo a la pendiente de fondo de la tubería y a su vez a la pendiente de la lámina de agua, razón por la cual mediante herramientas computacionales se realizó un ajuste polinómico cuadrático para generar la curva cóncava hacia arriba del criterio de Wu con la flecha del 15% en el centro de esta (Copete Rivera, 2012).

Las conclusiones más importantes obtenidas por Copete en su proyecto de grado se enuncian a continuación:

- Luego de probar las 22 ciudades analizadas, se obtuvo que, como habían mencionado López y Navarro, los costos serán mínimos si se maximiza la potencia unitaria de la red.
- Dados los altos costos computacionales, se recomienda mejorar el algoritmo de poda utilizado en la búsqueda exhaustiva realizada por el método de optimización empleado.
- Se recomienda seguir analizando el criterio de Wu en redes de drenaje urbano.

2.2 Redes de Drenaje Urbano

Las redes de drenaje urbano son fundamentales en el desarrollo de áreas urbanas gracias a la interacción entre el ser humano y el ciclo natural del agua, dando esto origen a los dos tipos de aguas que deben ser tratadas por estos sistemas: las aguas residuales y las pluviales (Butler & Davies, 2009). Ahora bien, dado que el objetivo principal de estas redes es el de minimizar los problemas causados a los seres humanos, así como al medio ambiente se hace una función primordial del Ingeniero el realizar diseños de redes de drenaje que cumplan con todos los requisitos hidráulicos para un funcionamiento adecuado de estas, así como la minimización de los costos involucrados en este proceso. Para llevar a cabo este objetivo, en primer lugar es fundamental entender que es un sistema de drenaje urbano, razón por la cual en este apartado se realizará una descripción de que este concepto, así como su clasificación y sus respectivos componentes, para así más adelante explicar en detalle en qué consiste el diseño de estas redes.

2.2.1 Significado e Importancia del Drenaje Urbano

Los sistemas de drenaje urbano, como ya se mencionó previamente, son bastante necesarios en el momento de urbanizar un espacio dada la interacción entre el ser humano y los ciclos hidrológicos presentes en la naturaleza. Típicamente esta interacción se da en dos formas: La primera, tomando agua del ciclo natural para abastecer al ser humano, y la segunda, cubriendo el suelo con superficies impermeables con el fin de desviar los sistemas de drenaje naturales existentes antes de la urbanización de una zona (Butler & Davies, 2009).

Las aguas residuales y pluviales surgen como consecuencia de las interacciones mencionadas anteriormente. Las aguas residuales se caracterizan por ser un recurso hídrico que ha sido utilizado para apoyar al ser humano en sus actividades, manteniéndole condiciones estándar para su subsistencia y el cumplimiento de las necesidades de la industria. Dado que estas aguas contienen materiales sólidos de diversos tamaños, e incluso disueltos, es necesario que después de su uso sean drenada adecuadamente para evitar problemas de salud pública (Butler & Davies, 2009). Por su parte, las aguas pluviales se refieren al agua que cae en los eventos de precipitación naturales del ciclo hídrico, pero que deben ser drenados ya que han caído en un área construida. Este tipo de agua se debe evacuar ya que puede generar problemas asociados a inundaciones que pueden llevar también a problemas de salud pública (Butler & Davies, 2009).



Figura 2.1. Inundación en Bosa durante la Ola Invernal del 2011. Tomado de Eltiempo.com¹

Como ya se pudo ver, la necesidad de que exista el drenaje urbano va de la mano del desarrollo de las comunidades, razón por la cual sin importar que tan aislada esté dicha comunidad, o el nivel de recursos que esta posea, el sistema de drenaje debe existir. Este hecho ha tenido como consecuencia que en estas comunidades no se haga un tratamiento adecuado de las aguas residuales, y que las aguas pluviales se drenen al campo como ocurriría naturalmente (Butler & Davies, 2009). Como consecuencia de lo anterior, a pesar que en la mayoría de zonas del mundo el drenaje está compuesto artificialmente por tuberías y demás componentes, se quiere implementar prácticas que sean sostenibles promoviendo el uso de configuraciones de sistemas mucho más naturales hasta donde sea posible.

2.2.2 Tipos de Sistemas de Drenaje Urbano

En el drenaje urbano existen tres tipos de sistema: El combinado, el Separado y el Híbrido, siendo importante esta diferenciación debido a que según el tipo de sistema que se vaya a diseñar los requerimientos pueden variar.

El primero de estos se caracteriza por transportar tanto las aguas residuales como las lluvias por la misma tubería, siendo el destino final de estas la planta de tratamiento. En las épocas secas del año, por la tubería combinada solamente fluirán las aguas

¹ Disponible en [http://www.eltiempo.com/Multimedia/galeria_fotos/bogot2/las-inundaciones-en-bosa-dejaron-cerca-de-2000-damnificados_10904928-5], Consultado en 2012.

residuales, pero una vez empieza la época invernal las aguas lluvias dominarán el flujo generado. Por esta razón, es evidente que no es factible económicamente dimensionar una tubería que tenga la capacidad total requerida en toda la longitud de esta dado que la mayoría del tiempo solo fluirá una pequeña proporción del caudal para el cual fue diseñada (Butler & Davies, 2009).

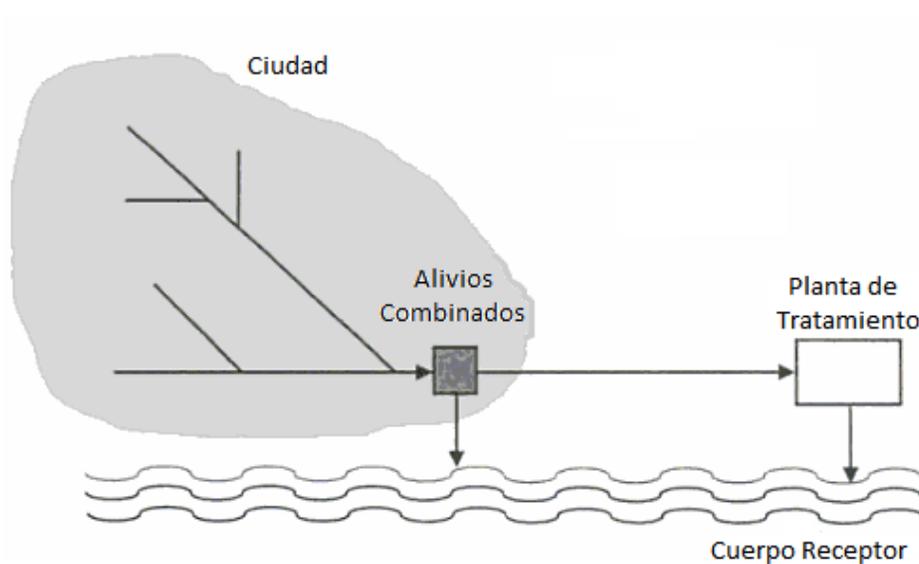


Figura 2.2. Esquema de un Sistema Combinado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009)

Para solucionar el problema generado cuando se presentan eventos de lluvias de magnitud media y alta se debe utilizar una estructura de Alivio Combinado (Copete Rivera, 2012), como la que se puede observar en la Figura 2.2. La principal función de esta estructura será la de desviar el flujo fuera del sistema combinado cuando la profundidad del agua supere un determinado nivel (Butler & Davies, 2009).

El sistema separado de drenaje urbano se caracteriza porque transporta las aguas residuales y las aguas lluvias en tuberías diferentes, pero que suelen ir en paralelo. En este tipo de sistema, cuyo esquema se encuentra en la Figura 2.3, se diseña una tubería que transporte el flujo máximo de aguas residuales que deberá ser entregado a la planta de tratamiento, mientras que en el caso de aguas lluvias, nuevamente, se va a tener una tubería de mayor tamaño que puede ser descargada en cualquier punto que sea conveniente del cuerpo receptor (Butler & Davies, 2009). La principal desventaja de este sistema corresponde al aumento en los costos al instalar otra tubería, ya que a pesar que el conducto de aguas residuales será más pequeño que el de aguas lluvias, y que ambas se instalen en paralelo utilizando la misma zanja, este sistema resultará más costoso que el combinado. Por otro lado, la principal ventaja del drenaje separado es que no se

requiere la existencia de los alivios combinados, y que la contaminación asociada con éstos se evita (Butler & Davies, 2009).

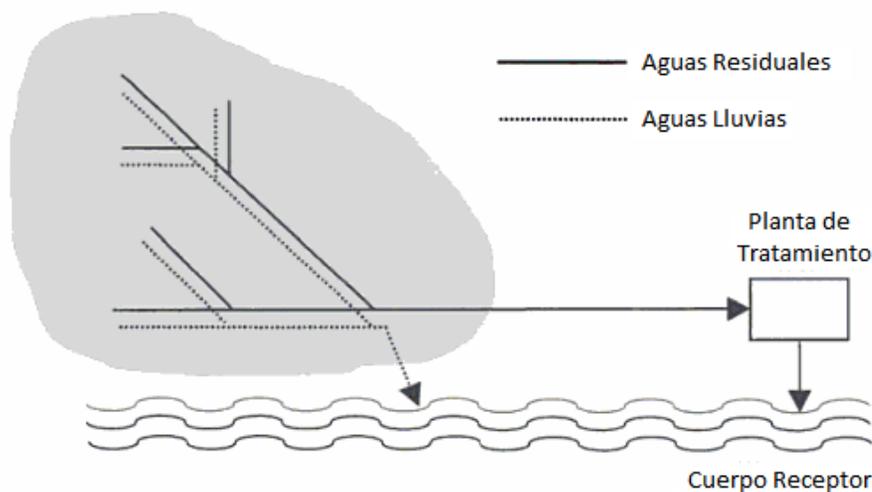


Figura 2.3. Esquema de un Sistema Separado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009)

Finalmente, los sistemas híbridos se caracterizan por ser una mezcla entre sistemas combinados y separados. Estos sistemas buscan construir sistemas separados cuando haya cuerpos de agua que funcionen como receptores cercanos a la zona que se va a urbanizar para verter allí las aguas lluvias, y que las aguas residuales sigan su curso hacia la planta de tratamiento por un sistema combinado (Copete Rivera, 2012).

2.2.3 Componentes de un Sistema de Drenaje Urbano

Sin importar el tipo de sistema de drenaje urbano que se desee construir, comúnmente estos sistemas se componen de los elementos descritos a continuación (López Sabogal, 2011):

- *Sumideros, Canaletas y Bajantes*: El principal uso de estos elementos es la recolección de los flujos que viajan por la superficie, como las aguas lluvias. Los sumideros, ubicados en los bordes de los andenes, se encargan de captar la escorrentía y transportarla hacia las tuberías de la red. En cuanto a las canaletas y bajantes son estructuras que se complementan y tienen el propósito también de captar aguas lluvias, pero esta vez de los tejados y edificaciones para transportarlas hacia la red.

- *Tuberías*: Encargadas del transporte del agua al interior de la red, son el principal componente de esta.
- *Cámaras de Inspección*: Estas estructuras se encargan de facilitar la realización de labores de mantenimiento e inspección al permitir el acceso a la red. También son utilizadas para funciones hidráulicas de la red tales como el cambio de dirección del flujo, cambios de diámetro entre dos tuberías y conexión con otras redes.
- *Cámaras de Caída*: En caso que el flujo llegue a la cámara de inspección con mucha energía, la estructura se encarga de disipar el exceso de esta con el fin de proteger la infraestructura del sistema.
- *Aliviaderos*: Se encargan de evacuar las aguas cuando estas sobrepasan un determinado nivel con el fin de reducir los costos de conducción. El tipo de aguas que evacua este elemento va a depender del tipo de sistema que se tenga.
- *Sifones Invertidos*: Estructuras utilizadas para sobrepasar obstáculos en el trazado de la red cuando estos son inevitables. Su funcionamiento se basa en la presurización de las tuberías.
- *Sistemas de Almacenamiento Temporal*: Retienen el agua con el propósito de disminuir los picos de caudal y de contaminación que se presentan cuando ocurre un evento de lluvia. El tiempo de retención no debe ser muy grande para evitar problemas asociados con los olores.
- *Canales Abiertos*: Su función principal es la de conducir aguas lluvias. Se debe limitar la velocidad del flujo para evitar problemas de erosión y sedimentación.
- *Estructura de Disipación de Energía*: Se encuentran ubicadas en los puntos de donde se entrega el agua, y se encargan de disipar energía para que el flujo pase de ser supercrítico a ser subcrítico.

2.3 Diseño de Redes de Drenaje Urbano

El diseño de redes de drenaje urbano es un procedimiento que requiere el cumplimiento simultáneo de múltiples restricciones, dentro de las cuales se encuentran aspectos

hidráulicos de la red tales como la capacidad de transportar el caudal de diseño al final de un periodo establecido, aspectos relacionados con el material de la tubería ya que estos deben resistir la corrosión y las cargas propias del suelo cuando son instaladas, y quizá la más importante de todas, se debe minimizar su costo, el cual está muy relacionado con los costos de excavación y de la tubería (ASCE, 2007). Por esta razón, en este apartado se describirá el supuesto bajo el cual se diseñan las redes de drenaje urbano, los parámetros involucrados en el proceso, las ecuaciones utilizadas, las restricciones que un diseño válido debe satisfacer y finalmente como manejar las interferencias con las redes de otros servicios públicos existentes en la zona donde se construirá el sistema de alcantarillado.

2.3.1 Suposiciones de Diseño: Flujo Uniforme

En la naturaleza, los flujos pueden clasificarse según dos criterios: Su variación en el espacio siendo éste variado o uniforme, y su variación en el tiempo siendo éste permanente o no permanente. Al combinar las condiciones previamente mencionadas se da origen a 3 tipos de flujo: Flujo Uniforme-Permanente, Flujo Uniforme-No Permanente, Flujo Variado-Permanente y Flujo Variado-No Permanente (Saldarriaga V., 2011). En los sistemas de drenaje urbano se utiliza el primero de estos flujos, el Flujo Uniforme, ya que este no cambia sus condiciones en tiempo ni en espacio, siendo esta una consideración adecuada al suponer que la lámina de agua sea constante en toda la longitud de la tubería (Chow, 2004).

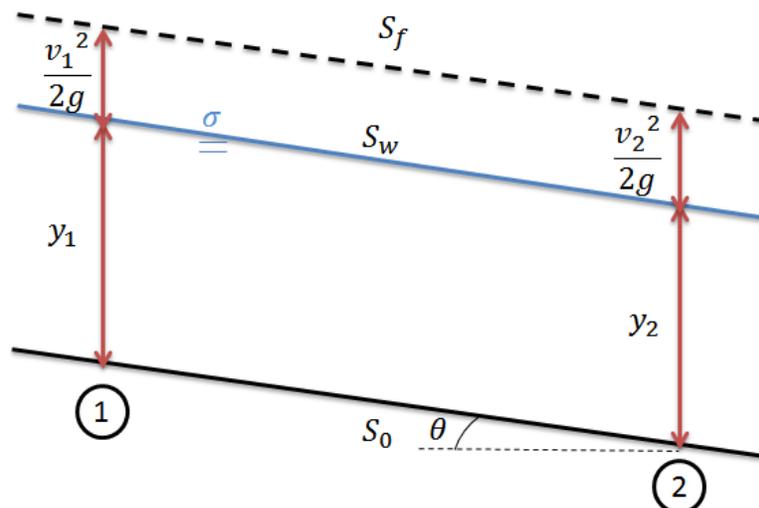


Figura 2.4. Flujo Uniforme en un Canal Abierto

A medida que el agua va fluyendo hacia aguas abajo por un canal, este empieza a imponer una resistencia al flujo representado por las fuerzas viscosas, y cuando estas se balancean con las fuerzas gravitacionales ocurre el Flujo Uniforme. Esta condición de flujo se caracteriza porque la velocidad, área mojada, caudal y profundidad son constantes en toda la longitud del canal (ver Figura 2.4). Sin embargo, la característica más importante de este flujo es que la línea de Energía Total, la superficie del agua (LGH) y el fondo del canal van a tener la misma pendiente, es decir, serán paralelas como se puede ver en la Ecuación 2.7 (Chow, 2004). La implicación más importante de lo mencionado anteriormente es que las pérdidas por fricción serán constantes en toda la longitud de la tubería.

$$S_w = S_f = S_0 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

S_w = Pendiente de la lámina de Agua (LGH) [-]

S_f = Pendiente de fricción (LET) [-]

S_0 = Pendiente del fondo del canal [-]

2.3.2 Ecuaciones de Diseño

La condición típica de flujo utilizada en los sistemas de alcantarillado son las tuberías fluyendo parcialmente llenas, siendo estas un caso especial de los canales abiertos (Butler & Davies, 2009).

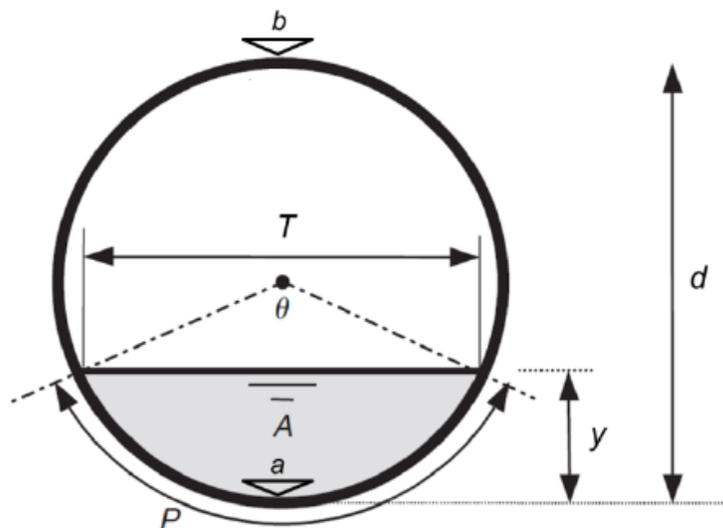


Figura 2.5. Sección transversal Tubería Fluyendo Parcialmente Llena. Tomado y Modificado de (Copete Rivera, 2012)

Por lo anterior, la sección transversal de las tuberías de drenaje urbano es un círculo, cuyas propiedades geométricas se muestran en la Figura 2.5. Como se puede apreciar, la determinación del diámetro d va a ser el eje central del diseño de alcantarillados, en donde será de gran importancia el conocimiento de las propiedades geométricas descritas en la Tabla 2.1. La selección de este diámetro se debe hacer con base en los parámetros del diseño del alcantarillado, dentro de los cuales se encuentra el caudal de diseño (Q_d) que debe transportar la tubería, el cual se estima para el final de la vida útil de esta, la rugosidad absoluta (K_s) del material del conducto, y la pendiente del terreno (S) en donde se construirá el sistema de drenaje urbano.

Propiedad Geométrica	Símbolo	Descripción	Unidades (SI)
Profundidad de flujo	Y_n	Altura del agua por encima de la cota de batea	[m]
Ángulo	θ	Ángulo formado en el centro de la tubería por la superficie libre	[rad]
Área Mojada	A	Área mojada de la sección transversal	[m ²]
Perímetro Mojado	P	Porción del perímetro del flujo que está en contacto con el canal	[m]
Radio Hidráulico	R	Área por unidad de perímetro	[m]
Ancho de la Superficie	T	Ancho del flujo en la superficie libre del agua	[m]
Profundidad Hidráulica	D	Área por unidad de ancho en la superficie	[m]
Cota de Batea	a	El punto más bajo de la sección transversal de la tubería	[msnm]
Cota Clave	b	El punto más alto de la sección transversal de la tubería	[msnm]

Tabla 2.1. Resumen de propiedades geométricas del alcantarillado. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2009) y (Copete Rivera, 2012)

Para llevar a cabo el cálculo de las propiedades geométricas mostradas previamente, es necesario utilizar las ecuaciones de diseño que serán mostradas a continuación (Butler & Davies, 2009):

- *Ángulo:*

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y_n}{d} \right)$$

Ecuación 2.8

- *Área Mojada:*

$$A = \frac{d^2}{8}(\theta - \sin(\theta))$$

Ecuación 2.9

- *Perímetro Mojado:*

$$P = \frac{d}{2}(\theta)$$

Ecuación 2.10

- *Radio Hidráulico:*

$$R = \frac{d}{4} \left[\frac{\theta - \sin(\theta)}{\theta} \right]$$

Ecuación 2.11

- *Ancho en la Superficie:*

$$T = d \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Ecuación 2.12

- *Profundidad Hidráulica:*

$$D = \frac{d(\theta - \sin(\theta))}{8 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Ecuación 2.13

Ahora bien, para el cálculo de la velocidad del flujo se tienen dos ecuaciones: La ecuación de Manning y la Ecuación de Chézy, la cual es utilizada con las ecuaciones de Colebrook-White y Darcy-Weisbach. A continuación se describirá cada una de estas ecuaciones con sus limitaciones y aplicaciones.

- **Ecuación de Manning**

La ecuación de Manning, propuesta por Robert Manning en 1889, es de naturaleza empírica que es tradicionalmente utilizada en el cálculo de canales abiertos fluyendo bajo la condición de flujo uniforme (Chow, 2004).

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

Ecuación 2.14

Donde:

n = Coeficiente de rugosidad de Manning [-]

R = Radio Hidráulico del canal abierto [m]

S = Pendiente de la línea de energía [-]

A pesar que esta ecuación es utilizada en canales abiertos como ya se mencionó, su uso en alcantarillados debe ser evitado ya que esta ecuación fue planteada para Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso, y dado que los materiales utilizados hoy en día en sistemas modernos son muy lisos, como el PVC, se darán flujos muy lisos invalidando así el rango de aplicación de la ecuación de Manning (Saldarriaga V., 2011).

- **Ecuación de Chézy**

El Ingeniero francés Antoine Chézy, hacia el año 1769 mientras realizaba sus experimentos en el río Yvette, propuso la que muchos consideran la primera ecuación para analizar el Flujo Uniforme: La ecuación de Chézy (Chow, 2004).

$$V = C\sqrt{RS} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

En la Ecuación 2.15, además de estar presente la pendiente de fricción y el radio hidráulico, aparece un término del que no se había hablado antes, el *C de Chézy*, el cual hace referencia a un factor de resistencia al flujo.

Si se combina la ecuación de Chézy con la físicamente basada de Darcy-Weisbach, la cual describe las pérdidas de fricción en la longitud de una tubería, se obtiene la siguiente relación:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

En donde f representa el factor de fricción de Darcy. Esta relación está indicando que el factor de resistencia de Chézy es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del factor de fricción. Una vez establecida esta relación, se puede reemplazar en la ecuación implícita de Colebrook-White para el cálculo del factor de fricción obteniendo así Ecuación 2.17.

$$C = -2\sqrt{8g} \log_{10} \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51C}{Re\sqrt{8g}} \right) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde K_s es la rugosidad absoluta de la tubería y g la aceleración de la gravedad. Despejando de la ecuación Chézy su factor C ($C = V/\sqrt{RS}$) y recordando la definición del número de Reynolds ($Re = 4RV/\nu$) se obtiene que para calcular la velocidad en el momento de realizar diseños de alcantarillados se debe utilizar la Ecuación 2.18.

$$V = -2\sqrt{8gRS} \log_{10} \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51v}{4R\sqrt{8gRS}} \right)$$

Ecuación 2.18

La ecuación utilizada para el cálculo de la velocidad del flujo en la tubería es explícita, e involucra en su deducción ecuaciones físicamente basadas como lo son las ecuaciones de Colebrook-White y Darcy-Weisbach, siendo esta la que mejor describe la resistencia fluida. Así mismo, esta ecuación es válida en todo el rango de turbulencia, es decir que incluye las zonas de FTHL y FTTHR dándole mayor aplicabilidad que la que tiene la de la ecuación de Manning (Saldarriaga V., 2011).

2.3.3 Restricciones de Diseño

Para garantizar el funcionamiento adecuado de los sistemas de drenaje urbano, el *Reglamento Técnico del Sector de Saneamiento Básico y Agua Potable – RAS 2000* establece algunas restricciones de diseño, tanto para sistemas combinados, separados e híbridos. En este apartado se describirán las principales restricciones que se recomienda que los alcantarillados cumplan según la normativa colombiana mencionada anteriormente (Copete Rivera, 2012).

- **Diámetro Interno Real Mínimo:** Previene la obstrucción de la red como consecuencia de la entrada de objetos grandes en esta. Para las tuberías que transportan aguas residuales el diámetro interno real mínimo es de 200 mm, y para las tuberías que transportan aguas lluvias este diámetro es de 250 mm ya que hay mayor riesgo que entren objetos que obstruyan la red.
- **Velocidad Mínima:** Con el fin de evitar que se presente sedimentación de partículas en el fondo de la tubería y que se disminuya la capacidad hidráulica de esta, se debe establecerse una velocidad mínima que ayude a establecer una pendiente mínima satisfaciendo así las condiciones de autolimpieza necesarias. En el caso de alcantarillado sanitario, esta velocidad mínima debe ser de 0.6 m/s, mientras que para sistemas pluviales esta debe ser de 0.75 m/s.
- **Esfuerzo Cortante Mínimo:** Asociado también con los requerimientos de auto limpieza de la tubería, se establece un esfuerzo cortante en las paredes mínimo que garantice el arrastre de sedimentos. Para el caso de aguas residuales, este esfuerzo cortante debe ser de 1.5 Pa, y de 2.0 Pa para aguas lluvias.

- **Velocidad Máxima:** Para proteger las paredes internas de las tuberías se establece una velocidad máxima, la cual va a ser función del material del conducto. Por lo general, se establece que este límite es de 5 m/s; sin embargo para materiales plásticos como el PVC se ha considerado que este límite puede ser de 10 m/s.
- **Pendiente Mínima y Máxima:** Los valores de las pendientes se establecen según las velocidades permitidas; la pendiente máxima será aquella para la cual se presenta la velocidad máxima, y de igual forma sucede con los valores mínimos, los cuales se establecen de acuerdo a las condiciones de autolimpieza.
- **Relación de Llenado Máxima:** Con el fin de permitir la ocurrencia de una superficie de aire al interior de la tubería y que esta no se presurice, el RAS 2000 recomienda que la relación de llenado máxima se encuentre en el rango de 70% a 85% (Copete Rivera, 2012). En consecuencia de lo anterior, este reglamento también establece que la relación de llenado debe ser función del diámetro como se muestra en la Tabla 2.2.

Relación de Llenado Máxima	Diámetro (m)
70%	≤ 0.5
80%	$0.5 < y_n/d < 1.0$
85%	≤ 1.0

Tabla 2.2. Porcentajes de Llenado Máximos según el diámetro de la tubería. Tomado de RAS2000

En esta restricción se debe tener especial cuidado con la ocurrencia del Flujo Cuasicrítico, es decir cuando el número de Froude se encuentra entre 0.7 y 1.5, ya que si se presentan simultáneamente este tipo de flujo con profundidades altas es muy probable que la tubería se presurice y ocurran sobrecargas de esta. Por lo anterior, si se presenta la condición de flujo cuasicrítico se recomienda que la relación de llenado máxima no supere el 70% (Ovalle Bueno, 2010).

- **Profundidad de la Cota Clave de la Tubería:** Con el fin de garantizar la protección de la tubería, y que las descargas domiciliarias puedan ser drenadas por gravedad, el RAS 2000 recomienda que la cota clave del conducto se encuentre mínimo a 0.75 metros cuando este se encuentre en zonas verdes o en vías peatonales, y que se encuentre mínimo a 1.20 metros cuando este se encuentre bajo vías vehiculares.

- *Profundidad Máxima a la Cota Clave:* El RAS 2000 recomienda que la profundidad máxima a la cota clave sea de 5 metros. Esta profundidad puede ser mayor siempre y cuando se garanticen las condiciones geotécnicas para este fin.

2.3.4 Manejo de Interferencias en Redes de Alcantarillado

Las interferencias se refieren a elementos que crean obstáculos para el desarrollo normal de labores de diseño, construcción o mantenimiento de redes de acueducto y alcantarillado. Dentro de estos objetos pueden encontrarse casas, lotes, calles, redes de otros servicios públicos, entre otros (EAAB, 2004), siendo en este aspecto muy importante el tamaño de las vías y la densidad poblacional de la zona (Penagos, 2012). Sobre las interferencias, es importante recordar que en las calles antiguas primero llegó la red, y luego la casa; aspecto que actualmente se evalúa ya que en las redes nuevas cada detalle se encuentra normatizado como sucede en la definición de corredores preferenciales propuestos por el Plan de Ordenamiento Territorial - POT (Penagos, 2012).

2.3.4.1 Investigación y Detección de Interferencias

El primer paso para manejar las interferencias en el momento del diseño, bien sea de acueducto o de alcantarillado, consiste en investigar sobre la presencia de estas en la zona aferente del proyecto por medio de la recopilación de información. Esta información requerida puede ser (EAAB, 2004):

- Información en planos referente a diseños y construcción de sistemas de acueducto y alcantarillado en las zonas aledañas a la zona del proyecto. Estos planos deben ser suministrados por EAAB.
- Información en planos referente al diseño y construcción de proyectos de redes de otros servicios públicos como telecomunicaciones, gas y luz. Estos planos deben ser suministrados por las empresas prestadoras de cada servicio.
- Información asociada con los planes de expansiones o ampliaciones de la red de servicios públicos, o bien sea la red vial. Esta información debe ser suministrada por las empresas prestadoras de servicios, o por el IDU en el segundo caso.
- Informes de ejecución de proyectos nuevos tales como edificaciones y mallas viales.

Luego de haber recopilado la información necesaria, se debe realizar una inspección y verificación de la zona del proyecto con el fin de evitar daños a elementos tales como tuberías, cables, ductos, entre otros que estén enterrados o de forma superficial cerca al área de excavación. Por lo tanto, se sugiere desarrollar las siguientes actividades (EAAB, 2004):

- Realizar entrevistas con habitantes del sector.
- Realizar apiques (pequeñas excavaciones) para identificar elementos que estén enterrados en la zona. Si se trata de una vía pavimentada, quien ejecuta el proyecto debe garantizar que esta quede en las mismas condiciones en las que estaba antes de hacer la exploración.
- Levantamientos altimétricos y planimétricos para la identificación de objetos superficiales que puedan afectar el desarrollo del proyecto.
- Verificar el funcionamiento de las redes de servicios públicos que estén causando interferencia. Será responsabilidad del constructor evitar la interrupción de estos hasta que se lleve a cabo la relocalización necesaria.
- Identificar redes de servicios informales como el suministro de agua potable por medio de mangueras, entre otros, ya que esto puede afectar el desarrollo del proyecto.

Para finalizar la etapa de investigación de interferencias, es importante mencionar que las tecnologías utilizadas en el proceso no deben afectar el funcionamiento normal de las otras redes, así como se debe dejar la zona en las mismas condiciones que se encontró (EAAB, 2004).

2.3.4.2 Recomendaciones al encontrar Interferencias

Luego de haber identificado todas las interferencias en la zona del proyecto, se recomienda tomar las siguientes acciones:

- Si se presentan interferencias en zonas de cruce (intersección de redes de servicios públicos), y estos obstáculos son de remoción lenta y prolongada se debe determinar la continuación del proyecto en otro tramo mientras la interferencia es resuelta por las autoridades pertinentes (EAAB, 2004).

- En el caso de requerir relocalizaciones de instalaciones como consecuencia de interferencias se debe coordinar con las empresas de servicios públicos involucrados como serán estas bajo la regulación de un ente como el Comité Técnico Operativo del Distrito, o uno equivalente (EAAB, 2004).
- Cuando el cruce sea con redes de distribución de agua potable, estas últimas deben ir por encima de la red de drenaje urbano (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Finalmente, cuando el cruce se da con redes de distribución de agua Potable, el RAS 2000 recomienda las distancias mostradas en la Tabla 2.3 en el caso de alcantarillados residuales, y las mostradas en la Tabla 2.4 en el caso de los alcantarillados pluviales (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). La distancia vertical se refiere a la separación entre la cota de batea del acueducto y la cota clave del alcantarillado.

Nivel de complejidad del sistema	Distancias mínimas
Bajo	1 m horizontal; 0.3 m vertical
Medio	1 m horizontal; 0.3 m vertical
Medio alto	1.5 m horizontal; 0.5 m vertical
Alto	1.5 m horizontal; 0.5 m vertical

Tabla 2.3. Distancias mínimas a redes de distribución de agua potable para alcantarillados sanitarios. Tomado de (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

Nivel de complejidad del sistema	Distancias mínimas
Bajo	1.0 m horizontal; 0.3 m vertical
Medio	1.0 m horizontal; 0.3 m vertical
Medio alto	1.2 m horizontal; 0.5 m vertical
Alto	1.2 m horizontal; 0.5 m vertical

Tabla 2.4. Distancias mínimas a redes de distribución de agua potable para alcantarillados pluviales. Tomado de (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

Como se puede ver en las tablas mostradas anteriormente, la distancia que debe haber entre la tubería de alcantarillado, sin importar su tipo, respecto a la tubería de agua potable se encuentra en función de la complejidad del sistema. El RAS 2000 enuncia que las tuberías de alcantarillado y acueducto nunca deben ir en la misma zanja, y que la cota de batea de las tuberías pertenecientes a la red de distribución deben ir siempre por encima de la cota clave del drenaje urbano (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

2.4 Criterios de Confiabilidad

2.4.1 Potencia Unitaria

La potencia unitaria es un concepto desarrollado por Saldarriaga & Romero en el año 2007, el cual se encarga de medir la confiabilidad del sistema cuantificando la energía que se pierde a lo largo de la red. A pesar que originalmente este concepto fue propuesto para redes de distribución de agua potable, se ha venido implementando al diseño de redes de drenaje urbano en donde ha mostrado tener un buen desempeño en los resultados arrojados (Copete Rivera, 2012).

En el caso de RDAP, la potencia unitaria se define como se muestra en la Ecuación 2.19.

$$PU = Q * (h_i - h_{i+1}) \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde:

PU = Potencia Unitaria [m^4/s]

Q = Caudal que pasa por la tubería [m^3/s]

h_i = Altura piezométrica en la cámara aguas arriba del tramo [m]

h_{i+1} = Altura piezométrica en la cámara aguas abajo del tramo [m]

Dado que el diseño de sistemas de alcantarillado se realiza bajo la suposición de flujo uniforme, se puede escribir la pendiente de fricción en función de las pérdidas por fricción y de la longitud del tramo como se muestra en la Ecuación 2.20.

$$S_f = \frac{h_f}{L} \rightarrow h_f = SL \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Reemplazando el término ($h_i - h_{i+1}$) por las pérdidas por fricción descritas en la Ecuación 2.20, se obtiene así la definición de Potencia Unitaria para sistemas de drenaje urbano, la cual se muestra en la Ecuación 2.21.

$$PU = Q * S * L \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde:

PU = Potencia Unitaria [m^4/s]

Q = Caudal que pasa por la tubería [m^3/s]

S = Pendiente de la tubería [-]

L = Longitud del tramo analizado [-]

2.4.2 Índice de Resiliencia

La resiliencia, concepto que fue definido por Ezio Todini en el 2000, relaciona la potencia por unidad de peso con la que opera el sistema con la máxima que el sistema puede tener, en otras palabras, calcula el superávit de potencia por unidad de peso que puede ser disipado por la red en caso de una falla (Mendoza & Saldarriaga, 2008). El índice de Resiliencia se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_r = 1 - \frac{P_d}{P_d^*} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Donde P_d hace referencia a la potencia por unidad de peso disipada por la red bajo condiciones de operación, y P_d^* a la potencia por unidad de peso máxima que puede ser disipada por la red.

En el caso de RDAP, se conoce que la potencia total disipada se puede describir mediante la siguiente expresión:

$$P_T = \sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Donde ne representa el número de embalses que abastecen a la red, Q_i al i -ésimo caudal y H_i a la i -ésima altura piezométrica de la red. Matemáticamente, se sabe que la potencia disipada en la red se puede escribir como:

$$P_d = P_T - P_e \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Donde P_t representa la potencia total disipada en la red, y P_e representa la potencia entregada en cada nudo de esta. Expresando la Ecuación 2.24 en términos de la Ecuación 2.23, con la diferencia que para calcular la potencia entregada en los nodos se tienen en cuenta no el número de embalses sino el número total de nodos nu , se obtiene:

$$P_d = \sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j \quad \text{Ecuación 2.25}$$

De la misma manera, se puede obtener una expresión para la máxima potencia por unidad de peso disipada por la red. Esta expresión se muestra en la Ecuación 2.26.

$$P_d^* = P_T - P_e^* \rightarrow P_d^* = \sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j^* H_j^* \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Donde Q_i^* es el caudal demandado en cada nodo, y H_i^* hace referencia a la altura piezométrica establecida por norma local. Al combinar la Ecuación 2.25 con la Ecuación 2.26 se obtiene la siguiente expresión para el índice de resiliencia:

$$I_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j H_j}{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j^* H_j^*} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Simplificando la Ecuación 2.27, finalmente se obtiene:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nu} Q_j^* (H_j - H_j^*)}{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{nu} Q_j^* H_j^*} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

2.5 Metodologías de Optimización

Para llevar a cabo la optimización de los sistemas de drenaje urbano se han utilizado diversas técnicas, algunas tomadas del diseño de Redes de distribución como es el caso del criterio de I-Pai Wu, algunas con mayor éxito que otras. En este apartado se resumirá una metodología propuesta por Prabhata Swamee en el año 2000 en donde se utiliza la optimización lineal al problema que se busca solucionar.

2.5.1 “Optimal Design of a Sewer Line Using Linear Programming” – Prabhata Swamee

Swamee, en el año 2001, propuso un algoritmo para el diseño optimizado de líneas de drenaje utilizando la programación lineal. Al definir las líneas de drenaje, el autor se refiere a la unidad básica del sistema la cual se repite varias veces para formar el sistema (Swamee, 2001). Este algoritmo, al no ser hidráulicamente basado, se puede catalogar como de “Fuerza Bruta” ya que consiste en aplicar herramientas que no son de esta área de la ingeniería, y por ende al ser generales son aplicables a problemas de otras disciplinas (Saldarriaga, 2007).

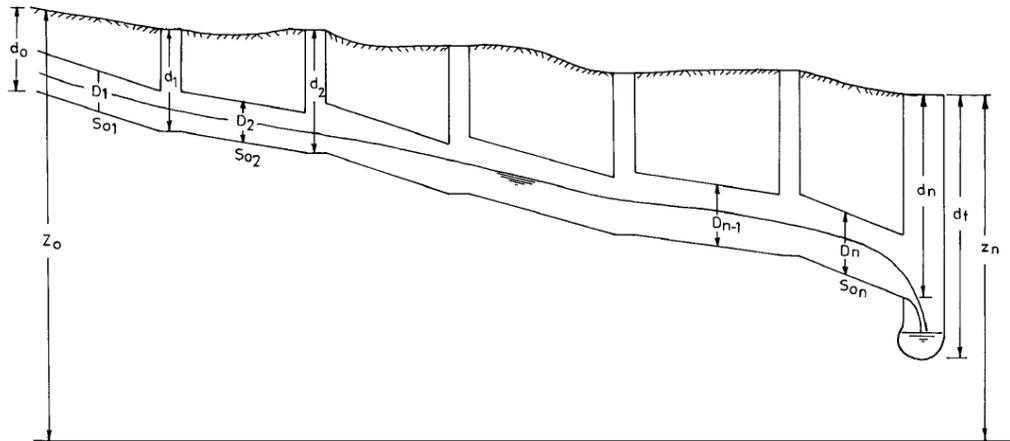


Figura 2.6. Línea de Drenaje. Tomado de (Swamee, 2001)

Para entender este algoritmo, es necesario conocer cada una de las ecuaciones empleadas por Swamee para describir tanto la función objetivo como las restricciones del modelo. Respecto al funcionamiento del modelo, este se basa en ecuaciones no lineales que incorporan los diámetros comerciales en sus variables de decisión, tratando los pozos de inspección como nodos y las tuberías conectantes como arcos (Swamee, 2001). El problema con el manejo de diámetros radica en que como estos deben ser nominales, la calidad del óptimo se pierde al dejar de ser una variable continua.

2.5.1.1 Función de Costos

Ahora bien, al hablar de las ecuaciones empleadas por Swamee, el primer grupo de estas que el planteó hace referencia a los costos.

- *Costo de la tubería*

$$C_{pi} = k_m L_i D_i^m$$

Ecuación 2.29

Donde:

C_{pi} = Costo de tubería para el arco i [dólares]

K_m y m = Parámetros obtenidos de la regresión realizada con los costos de la tubería

L_i = Longitud del arco i [m]

D_i = Diámetro de la tubería i [m]

- *Costo de Excavación*

$$C_{ei} = \frac{1}{2} L_i w_i [c_e (d_{i-1} + d_i) + \frac{1}{3} c_r (d_{i-1}^2 + d_{i-1} d_i + d_i^2) + c_s L_i (d_{i-1} + d_i)] \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Donde:

C_{ei} = Costo de excavación en el arco i [dólares]

C_e = Costo por unidad de volumen de tierra [dólares/m³]

C_r = Incremento en costo de excavación por unidad de profundidad [dólares/m⁴]

C_s = Costo de entibado [dólares/m²]

d_i = Profundidad del nodo i [m]

w_i = Ancho de la zanja [m], dado por la Tabla 2.5.

Ancho de la Zanja w_i (m)	Diámetro D_i (m)
1	≤ 0.6
$D_i + 0.4$	> 0.6

Tabla 2.5. Ancho de la Zanja según el diámetro de la tubería. Tomado y Modificado de (Swamee, 2001)

- *Costo de Excavación en la Cámara de Inspección*

$$C_{hi} = K_h d_i \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Donde:

C_{hi} = Costo del pozo de inspección en el nodo i [dólares]

K_h = Coeficiente de costo del pozo de inspección [dólares/m]

2.5.1.2 Relaciones de Resistencia del Modelo

Swamee utilizó las siguientes ecuaciones para describir la resistencia del flujo, así como propiedades de este como su velocidad y caudal para posteriormente relacionarlos con la relación de llenado y el diámetro de la tubería y así completar el diseño.

- *Velocidad y Caudal Máximos*

$$V_i = -2.457 \sqrt{gRS_0} \ln \left(\frac{\varepsilon}{12R} + \frac{0.221\nu}{R\sqrt{gRS_0}} \right) \quad \text{Ecuación 2.32}$$

$$V_{max} = -1.355 \sqrt{gDS_0} \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.65D} + \frac{1.32\nu}{D\sqrt{gDS_0}} \right) \quad \text{Ecuación 2.33}$$

$$Q_i = -2.457A\sqrt{gRS_0} \ln\left(\frac{\varepsilon}{12R} + \frac{0.221\nu}{R\sqrt{gRS_0}}\right) \quad \text{Ecuación 2.34}$$

$$Q_{max} = -D^2\sqrt{gDS_0} \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.46D} + \frac{1.43\nu}{D\sqrt{gDS_0}}\right) \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Donde:

A = Área mojada de la tubería fluyendo parcialmente llena [m²]

D = Diámetro de la tubería [m]

ε = Rugosidad absoluta de la tubería [m]

ν = Viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

- *Diámetro*

$$D = K_D \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{Q^2}{gS_0} \right)^{4.75} + \frac{\nu Q^{9.4}}{(gS_0)^{5.2}} \right]^{0.04} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

$$K_D = \frac{0.442}{\eta^{0.8}} + 0.164\eta + \left(\frac{\eta}{1.2} \right)^{16} \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Donde:

η = Relación de llenado de la tubería [-]

K_D = Coeficiente asociado con el diámetro

- *Relación de llenado*

$$\eta = 0.943 \left(0.0683 \left\{ \left(\frac{Q_{max}}{Q} \right)^{0.886} \left[1 + \left(\frac{Q}{Q_{max}} \right)^{1.69} \right] - 2 \right\}^{0.357} + 1 \right)^{-12.25} \quad \text{Ecuación 2.38}$$

Para estimar una relación de llenado, se puede utilizar la Tabla 2.6.

Diámetro de la Tubería D (m)	Relación de Llenado η
0.15 – 0.25	0.50
0.30 – 0.50	0.60
0.55 – 1.20	0.70
>1.20	0.75

Tabla 2.6. Estimación de la relación de llenado según Swamee. Tomado y modificado de (Swamee, 2001)

2.5.1.3 Restricciones del Modelo

Las restricciones utilizadas en el modelo de Swamee se describen a continuación.

- *Cota de Entrega*

Para Swamee fue un factor muy importante considerar la cota de entrega del sistema de drenaje urbano al cuerpo receptor. Por esto propuso esta restricción:

$$d_f \geq d_0 + z_n - z_0 + \sum_{j=1}^n L_j S_{0j} \quad \text{Ecuación 2.39}$$

Donde:

d_f = Cota de entrega al cuerpo receptor [msnm]

n = Número de nodos en la red de drenaje urbano

Para obtener esta restricción, Swamee se apoyó en la Ecuación 2.41 y la Ecuación 2.41.

$$S_{0i} = \frac{d_i - d_{i-1} + z_{i-1} - z_i}{L_i} \quad \text{Ecuación 2.40}$$

$$d_i = L_i S_{0i} + d_{i-1} + z_i - z_{i-1} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

Donde:

z_i = Cota del nodo i [msnm]

d_i = Profundidad del nodo i [m]

- *Restricción de Flujo*

$$D_{si} = k_{Di} \varepsilon^{0.05} \left(\frac{Q_i^2}{g} \right)^{0.19} \quad \text{Ecuación 2.42}$$

$$S_{0i} = \left(\frac{D_{si}}{D_i} \right)^{5.26} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

Donde:

K_{Di} = Coeficiente asociado al diámetro de la tubería del nodo i

- *Restricción en la profundidad de excavación*

$$d_i \geq \max(D_{i-1}, D_i) + h_{min}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Ecuación 2.44}$$

$$d_i \leq d_{max} \quad \text{Ecuación 2.45}$$

- *Restricción de Velocidad*

Para calcular la velocidad se utiliza:

$$V_i = \frac{4Q}{D_i^2 [\cos^{-1}(1 - 2\eta_i) - 2(1 - 2\eta_i)\sqrt{\eta_i(1 - \eta_i)}]} \quad \text{Ecuación 2.46}$$

- Restricción de Velocidad Mínima

$$V_i \leq V_{sc} \quad \text{Ecuación 2.47}$$

Donde:

V_{sc} = Velocidad para que se cumplan los criterios de autolimpieza [m/s]

- Restricción de Velocidad Máxima

$$V_{imax} \leq V_s \quad \text{Ecuación 2.48}$$

Donde:

V_s = Velocidad para que se presente socavación en la tubería [m/s]. Se obtiene de la Tabla 2.7.

Material de la Tubería	Velocidad de Socavación S_c
Hierro fundido	3.5 – 4.5
Gres	3.0 – 4.5
Concreto	2.5 – 3.0
Ladrillo	1.5 – 2.5

Tabla 2.7. Velocidad de Socavación según el material de la tubería. Obtenido y Modificado de (Swamee, 2001)

Ahora bien, en el caso que la restricción de velocidad mínima sea incumplida, se debe partir la línea de drenaje en dos, y diseñarlas independientes una de la otra. Para este procedimiento, se debe recalcular la pendiente de la tubería utilizando la ecuación mostrada a continuación:

$$S_{0i} = \frac{0.545V_s^2}{gD_i} \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.65D_i} \right) \right]^{-2} \quad \text{Ecuación 2.49}$$

2.5.1.4 Algoritmo de Optimización

Luego de revisar las ecuaciones que empleó Swamee en su metodología de optimización, se explicará a continuación como es el algoritmo empleado definiendo claramente la función objetivo que se busca minimizar y dos funciones complementarias que son importantes dentro del modelo. La función objetivo es:

$$F = k_h d_0 + \sum_{i=1}^n (L_i \{ k_m D_i^m + \frac{1}{2} w_i [c_e (d_{i-1} + d_i) + \frac{1}{3} c_r (d_{i-1}^2 + d_{i-1} d_i + d_i^2)] + c_s (d_{i-1} + d_i) \} + k_h d_i) \quad \text{Ecuación 2.50}$$

Para que la función objetivo pueda ser minimizada, se exige que la restricción mostrada en la Ecuación 2.39 posea una holgura asociada. Para comprobar esto, se debe derivar la Ecuación 2.50 con respecto al diámetro en el nodo i (D_i) e igualarse a cero, obteniendo así las siguientes expresiones:

$$D_i = \left\{ \frac{5.26 D_{si}^{5.26}}{m k_m} \left[(n - i + 1) k_h + k_{ei} L_i + 2 \sum_{j=i+1}^n k_{ej} L_j \right] \right\}^{\frac{1}{(m+5.26)}}, \quad i < n \quad \text{Ecuación 2.51}$$

$$D_n = \left[\frac{5.26 D_{sn}^{5.26}}{m k_m} (k_h + k_{en} L_n) \right]^{\frac{1}{m+5.26}} \quad \text{Ecuación 2.52}$$

$$k_{ei} = \frac{1}{2} w_i \left(c_e + \frac{1}{3} c_r \frac{d_{i-1}^2 + d_{i-1} d_i + d_i^2}{d_{i-1} + d_i} \right) + c_s \quad \text{Ecuación 2.53}$$

Donde k_{ei} es el coeficiente de los costos de excavación.

Para comprobar el criterio de holgura, se deben calcular los diámetros con las ecuaciones 2.51 y 2.52, y si este se cumple se puede concluir que los diámetros son correctos. Si este criterio no se cumple, significa que la restricción mostrada en la Ecuación 2.39 es estricta suponiendo que $d_n = d_f$, es decir:

$$d_0 + z_n - z_0 + \sum_{i=1}^n L_i \left(\frac{D_{si}}{D_i} \right)^{5.26} - d_f = 0 \quad \text{Ecuación 2.54}$$

Al combinar las Ecuaciones 2.51 y 2.53 con el Multiplicador de Lagrange λ , se obtienen las expresiones para los diámetros mostradas a continuación:

$$D_i = \left\{ \frac{5.26 D_{si}^{5.26}}{m k_m} \left[\lambda + (n - i + 1) k_h + k_{ei} L_i + 2 \sum_{j=i+1}^n k_{ej} L_j \right] \right\}^{\frac{1}{(m+5.26)}} , i < n \quad \text{Ecuación 2.55}$$

$$D_n = \left[\frac{5.26 D_{sn}^{5.26}}{m k_m} (\lambda + k_h + k_{en} L_n) \right]^{\frac{1}{m+5.26}} \quad \text{Ecuación 2.56}$$

En este caso, se debe resolver por método de prueba y error simultáneamente las Ecuaciones 2.53 y 2.54 para obtener así el diámetro y el valor del multiplicador de Lagrange. Una vez se tengan los diámetros para toda la red, estos deben ser aproximados al diámetro comercial más cercano.

En resumen, el algoritmo se encuentra explicado en el diagrama de flujo mostrado en las Figuras 2.7 y 2.8.

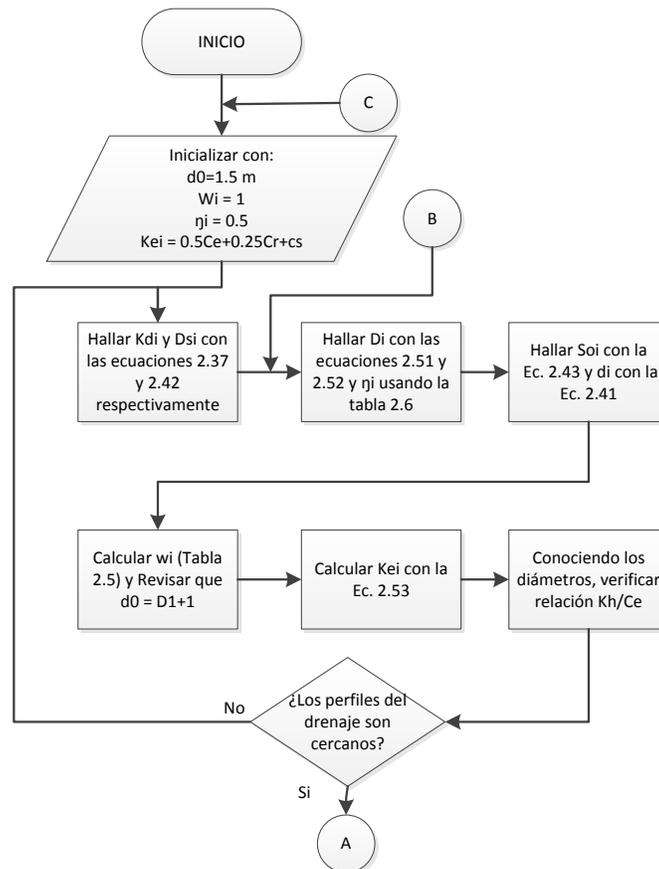


Figura 2.7. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Swamee. Tomado de (Swamee, 2001).

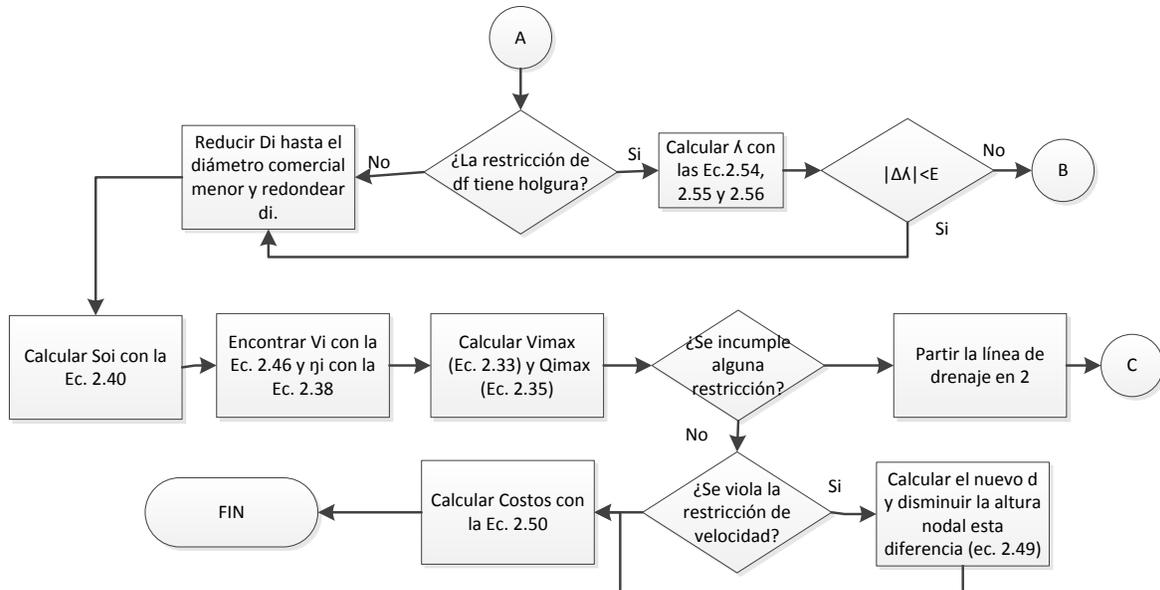


Figura 2.8. Segunda parte del Algoritmo de Swamee. Tomado de (Swamee, 2001)

3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO OPTIMIZADO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LA RESILIENCIA Y LA POTENCIA UNITARIA

Para cumplir con los objetivos propuestos dentro de este Proyecto de Grado se utilizó la metodología que se describirá a continuación. En primer lugar se hablará del programa desarrollado por el grupo CIE-AGUA, el cual se basó en la metodología propuesta por Andrés López en el 2011. En segundo lugar, se explicarán las funciones de costos propuestas por el autor para describir el comportamiento de estos en el diseño de sistemas de drenaje urbano, y finalmente, se explicará la propuesta realizada para el Índice de Resiliencia, la cual busca ser otro criterio adicional a la potencia unitaria para llevar a cabo exitosamente el diseño de la red.

3.1 Programa CIE-AGUA

El programa utilizado para realizar el diseño de las redes de alcantarillado en este proyecto de grado fue el que está siendo desarrollado por el Grupo CIE-AGUA, perteneciente al CIACUA. A continuación, se describirán los algoritmos en los que se fundamenta el funcionamiento del programa, tanto para la selección de el diámetro y la pendiente de cada tramo individualmente, así como el algoritmo de búsqueda exhaustiva utilizado para la formación de la red. Es importante mencionar, que originalmente este se ejecutaba con los costos propuestos por Ivonne Navarro en el 2009, pero para efectos de este proyecto estos fueron modificados.

3.1.1 Selección del Diámetro y Pendiente de Diseño para un Tramo

El procedimiento utilizado por el programa con el fin de seleccionar el diámetro y la pendiente de diseño para un tramo del sistema consiste en primer lugar en reconocer los parámetros de diseño del sistema, es decir, el caudal de diseño, el material de la tubería y el conjunto de diámetros comerciales, el cual se muestra en la Tabla 3.1. El material utilizado en el proyecto de grado fue PVC con una rugosidad absoluta de 1.5×10^{-6} metros, y el fluido que circulará por el sistema se supondrá agua con una viscosidad cinemática de $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Diámetros Comerciales (pulg.)	Diámetros Reales Internos (m)
6	0.151
8	0.203
10	0.253
14	0.32
18	0.36
20	0.40
24	0.595
27	0.671
30	0.747
33	0.823
36	0.899
39	0.974
42	1.05
45	1.127

Tabla 3.1. Lista de Diámetros comerciales utilizados

Con estos parámetros iniciales definidos por el diseñador, y una pendiente discreta que incluye el programa, este calcula la velocidad del flujo utilizando la Ecuación 2.18, la cual se mostró previamente (Ver Numeral 2.3.2). Posteriormente, utilizando el principio de continuidad se calcula el caudal como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$Q = vA$$

Ecuación 3.1

Si al comparar el caudal calculado, este resulta ser mayor al caudal de diseño se puede concluir que se ha encontrado el diámetro que debe tener la tubería para que su capacidad hidráulica alcance a transportar la descarga requerida por el sistema. En caso que esto no se cumpla, se debe aumentar al siguiente diámetro comercial de la lista y repetir el procedimiento hasta que se cumpla la condición en donde el caudal que transporta la tubería sea mayor al de diseño. Una vez el diámetro cumpla con el caudal de diseño requerido, se debe disminuir la relación de llenado máxima para transportar exactamente la descarga requerida, y así estará completamente hecho el diseño (CIACUA, 2012).

En cuanto la pendiente de la tubería, se decidió discretizar este valor siguiendo la metodología propuesta por López y Saldarriaga en el 2011. Para este fin, se emplearon valores para este parámetro dentro de un rango de 0.001 hasta 0.1, con pasos de un metro por cada kilómetro avanzado (1/1000), cifra que se seleccionó porque es muy difícil asegurar precisión constructiva con tamaños de paso inferiores (López Sabogal, 2011).

Dado que hay situaciones para las cuales se desaprovecha la capacidad de la tubería, aparece el concepto de Pendiente Propia, la cual hace referencia a la pendiente que hace que para un diámetro dado, fluya el caudal de diseño con la relación de llenado más alta posible (CIACUA, 2012). Dentro de las ventajas de discretizar la pendiente se encuentra que la elección de esta deja de ser una decisión subjetiva del diseñador, teniendo esto como consecuencia una optimización en su uso al permitir explorar alternativas que bajo el diseño tradicional no se hubiesen tenido en cuenta (López Sabogal, 2011).

En el diagrama de flujo mostrado en las Figuras 3.1 y 3.2 se muestra el procedimiento descrito anteriormente.

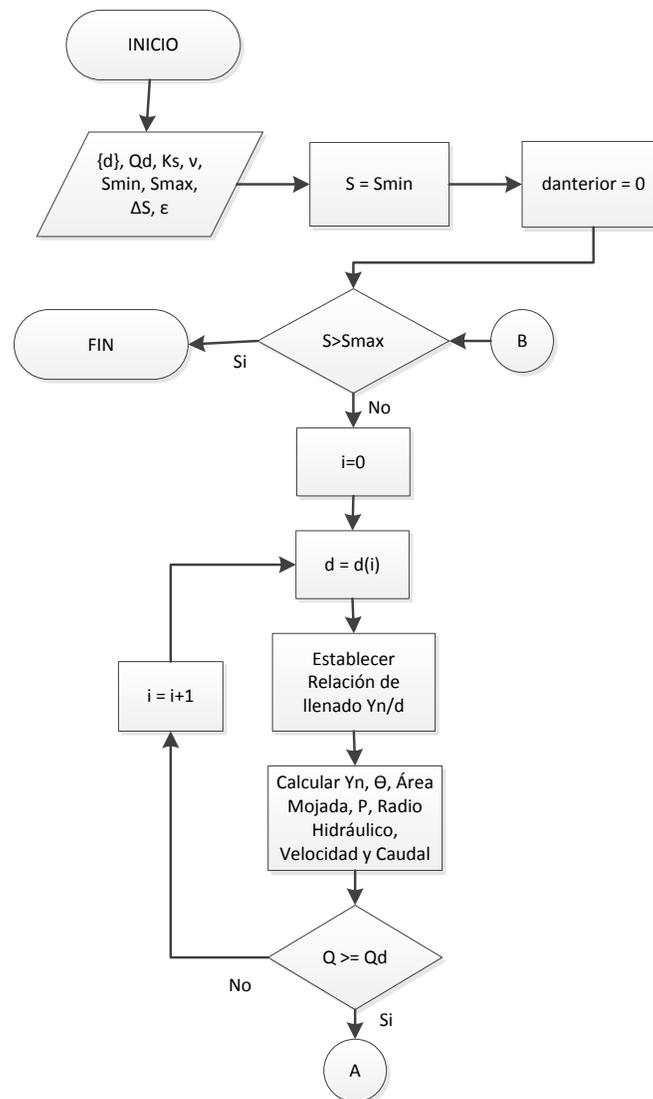


Figura 3.1. Diagrama de Flujo Selección Diámetro y Pendiente de un Tramo. Tomado y Adaptado de (CIACUA, 2012)

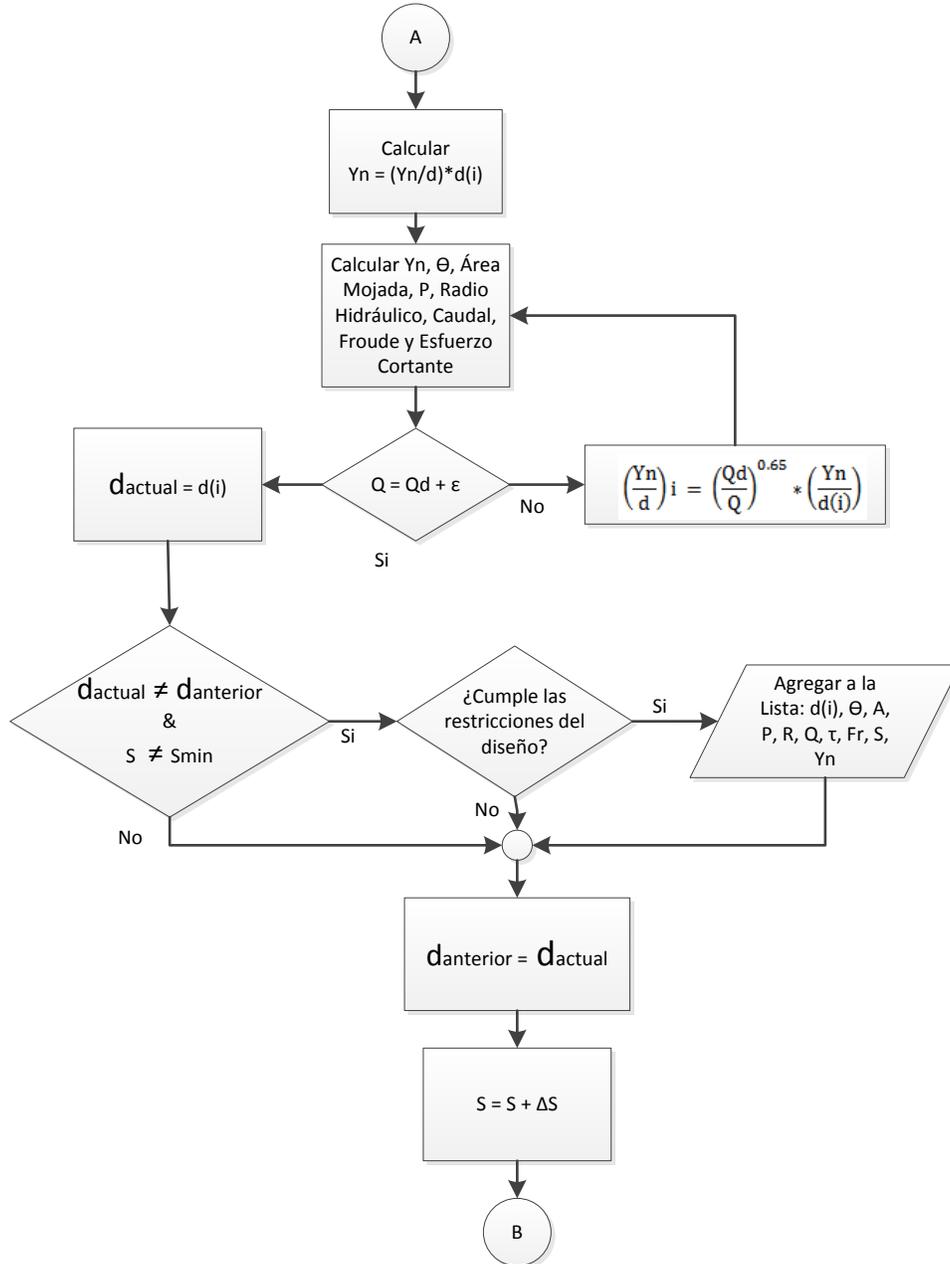


Figura 3.2. Continuación Diagrama de Flujo Selección Diámetro y Pendiente de un Tramo. Tomado y Adaptado de (CIACUA, 2012)

3.1.2 Formación de Tramos a Través de la Búsqueda Exhaustiva

Para determinar la configuración óptima de la línea principal de la red de drenaje urbano, el programa CIE-AGUA utiliza un algoritmo de búsqueda exhaustiva, garantizando así la obtención de un mínimo global en los costos del sistema al analizar cada una de las alternativas hidráulicamente válidas, cumpliendo de esta manera con el propósito del diseño optimizado (CIACUA, 2012).

Una alternativa hace referencia a la combinación de diseños individuales de cada tramo que conforman la red principal de drenaje urbano (CIACUA, 2012). De acuerdo con lo anterior, el número total de alternativas disponibles para cada red se puede expresar mediante la Ecuación 2.5 (Ver Numeral 2.1.3).

El programa CIE-AGUA realiza una búsqueda exhaustiva, es decir que evalúa todas las alternativas disponibles para así seleccionar la mejor, desarrollando estructuras de datos en forma de árbol con tantas ramificaciones como alternativas se desprendan de cada tramo (CIACUA, 2012). Para comprender esto mejor, se realizará un ejemplo en donde la red principal tendrá 3 tramos, cada uno con 2, 3 y 2 diseños válidos respectivamente como se muestra en la Figura 3.3 (CIACUA, 2012).

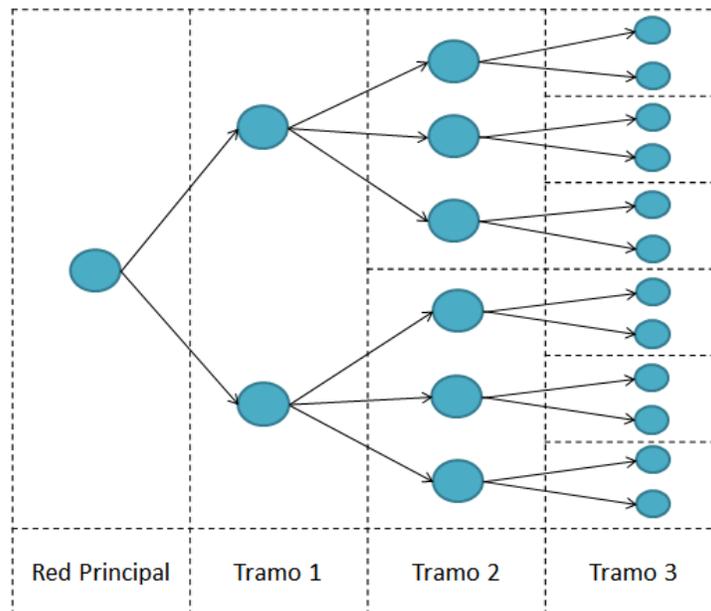


Figura 3.3. Ejemplo de Estructura de Datos en Árbol. Tomado y Modificado de (CIACUA, 2012)

Al utilizar la Ecuación 2.5, se puede evidenciar que el número de alternativas es:

$$NTA = \prod_{i=1}^n P_i = (2) * (3) * (2) = 12 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Del cálculo anterior se puede demostrar que la Ecuación 2.5 es válida para indicar tanto el número de alternativas que tiene la red, así como el número de caminos (o ramas) por las que se puede recorrer la estructura de datos (CIACUA, 2012).

El aspecto innovador que ofrece CIE-AGUA respecto a las metodologías empleadas por (López Sabogal, 2011) y (Copete Rivera, 2012) radica en el tiempo computacional requerido para la evaluación exhaustiva de las alternativas, lo cual a su vez es viable gracias al algoritmo de recurrencia empleado por el programa en mención (CIACUA, 2012).

3.2 Costos Involucrados en el Diseño de Alcantarillados

Los costos involucrados en el diseño de los sistemas de alcantarillado son un criterio fundamental en el momento de seleccionar cual alternativa es mejor que otra dentro de un grupo de posibilidades donde todas son funcionales hidráulicamente hablando, es decir, son utilizados como un criterio de optimización. Por lo anterior, se hará una breve descripción de los diferentes componentes de las funciones de costo involucradas en el diseño de los sistemas de alcantarillados con el fin de introducir luego las funciones propuestas por el autor para cada tramo así como su deducción para cada uno de estos componentes.

3.2.1 Costos de la Tubería

El costo de la tubería hace referencia a los costos involucrados en el suministro e instalación de los conductos, sin tener en cuenta el componente asociado con la excavación (IDU, 2012).

Para la obtención de esta función de costo, se utilizó el catálogo de precios de PAVCO para tuberías NOVALOC y NOVAFORT publicada en Febrero de 2012 y vigente hasta la fecha. De este catálogo se tomó el precio en pesos colombianos (\$COP) sin I.V.A (Impuesto al Valor Agregado) para un metro lineal de tubería de diferentes diámetros comerciales. Estos valores se muestran en las Tablas 3.2 y 3.3.

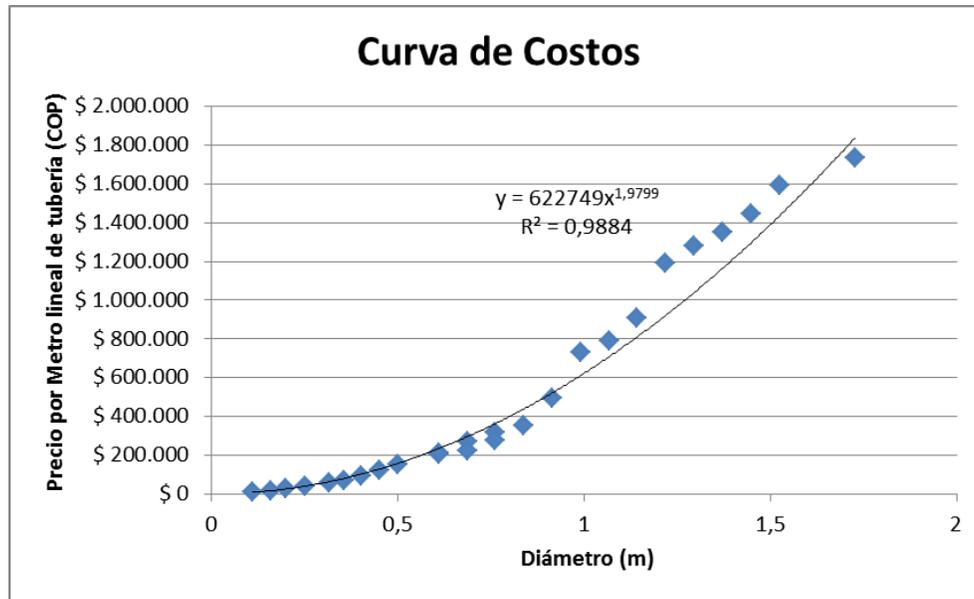
NOVAFORT				
Diámetro (mm)	Diámetro (m)	Precio/tubo	Longitud (m)	Precio/metro
110	0,11	54128	6	\$ 9.021,33
160	0,16	98305	6	\$ 16.384,17
200	0,2	143707	6	\$ 23.951,17
250	0,25	208912	6	\$ 34.818,67
315	0,315	308883	6	\$ 51.480,50
355	0,355	356950	6	\$ 59.491,67
400	0,4	478430	6	\$ 79.738,33
450	0,45	629250	6	\$ 104.875,00
500	0,5	781062	6	\$ 130.177,00
Diámetro (in)	Diámetro (m)	Precio/tubo	Longitud (m)	Precio/metro
24	0,6096	1153793	6,5	\$ 177.506,62
27	0,6858	1242916	6,5	\$ 191.217,85
30	0,762	1551846	6,5	\$ 238.745,54

Tabla 3.2. Precios en Pesos Colombianos (sin IVA) por metro lineal de Tubería NOVAFORT. Tomado de (PAVCO, 2012)

NOVALOC		
Diametro (in)	Diametro (m)	Precio/m
24	0,6096	\$ 180.809
27	0,6858	\$ 231.854
30	0,762	\$ 272.451
33	0,8382	\$ 306.040
36	0,9144	\$ 428.361
39	0,9906	\$ 632.201
42	1,0668	\$ 678.671
45	1,143	\$ 785.188
48	1,2192	\$ 1.027.008
51	1,2954	\$ 1.104.755
54	1,3716	\$ 1.162.855
57	1,4478	\$ 1.244.898
60	1,524	\$ 1.375.804
68	1,7272	\$ 1.495.225

Tabla 3.3. Precios en Pesos Colombianos (sin IVA) por metro lineal de Tubería NOVALOC. Tomado de (PAVCO, 2012)

Al incluir el I.V.A a los precios mostrados previamente, el cual es del 16% (APCI, 2012), se graficó el diámetro de cada una de las tuberías (en metros) contra el precio por metro lineal (en pesos colombianos), y se ajustó una regresión potencial a estos. El resultado se puede apreciar en la Gráfica 3.1.



Gráfica 3.1. Curva de Costos para Tuberías de Alcantarillado en (\$COP)

Como se puede observar, la regresión potencial tiene un coeficiente de determinación R^2 de 0.9884, significando esto que para el costo de la tubería, al igual que en RDAP, se mantiene el comportamiento potencial de la función. Utilizando los parámetros de la regresión realizada, se obtiene que la función de costos asociada es:

$$C = 622749d^{1.9799} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

C = Costo de la tubería por metro lineal incluyendo IVA [\$COP/m]

d = Diámetro de la tubería en metros [m]

Finalmente, para terminar de definir completamente la función que describirá los costos de la tubería dentro de un tramo de la red de drenaje urbano, se debe multiplicar la Ecuación 3.3 por la longitud de este, resultando así la expresión mostrada a continuación:

$$C_{Tubería} = L * 622749d^{1.9799} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

$C_{Tubería}$ = Costo total asociado a la tubería de un tramo de la red [\$COP]

L = Longitud del tramo analizado [m]

d = Diámetro de la tubería colocada en el tramo analizado [m]

3.2.2 Costos de Excavación

Dentro de los costos de excavación asociados con las redes de alcantarillado se pueden distinguir 4 componentes principales: El costo de excavación en sí, el costo de entibado, el costo de relleno y el costo asociado con las cámaras de inspección.

3.2.2.1 Costos de Excavación en Sí

Para la construcción de los sistemas de alcantarillados se pueden utilizar dos tipos de excavación: los métodos mecánicos y los métodos manuales (IDU, 2012). Los métodos mecánicos deben utilizarse cuando el sistema vaya a ser construido en calles anchas, y donde las construcciones y redes existentes lo permitan sin que estas se vean afectadas por aspectos como el ingreso de maquinaria pesada y todo lo demás que este método requiere. En contraposición, se recomienda usar el método manual cuando la construcción del sistema de drenaje se vaya a realizar en calles estrechas, cercanas a estructuras y con redes de servicios públicos cerca (EAAB, 2006). Como consecuencia de lo anterior, para el desarrollo de este proyecto se utilizarán los métodos manuales de excavación ya que estos consideran un rango de situaciones más generales según la normativa del Acueducto.

Para el planteamiento de las funciones de costo asociada a los costos de excavación, se utilizaron las cifras mostradas en la Tabla 3.4, obtenidos del Listado de Precios de Referencia de Actividades de Obra del IDU en su versión del 2012.

Actividad	Unidades	(\$COP)
Excavación Manual para Redes Profundidad 0 – 2 m (Incluye cargue)	m ³	20,119.53
Excavación Manual para Redes Profundidad 2 – 3.5 m (Incluye cargue)	m ³	25,938.52
Excavación Mecánica para Redes Profundidad 0 – 3.5 m (Incluye cargue)	m ³	3,794.45

Tabla 3.4. Costos de Excavación para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012)

Ahora bien, en la Figura 3.4 se muestra el esquema de un tramo de tubería de longitud L , cuya cota clave al inicio de la tubería se encuentra enterrada a una profundidad $H_{inicial}$, y la cota clave del final del conducto se encuentra a una profundidad H_{final} de la superficie.

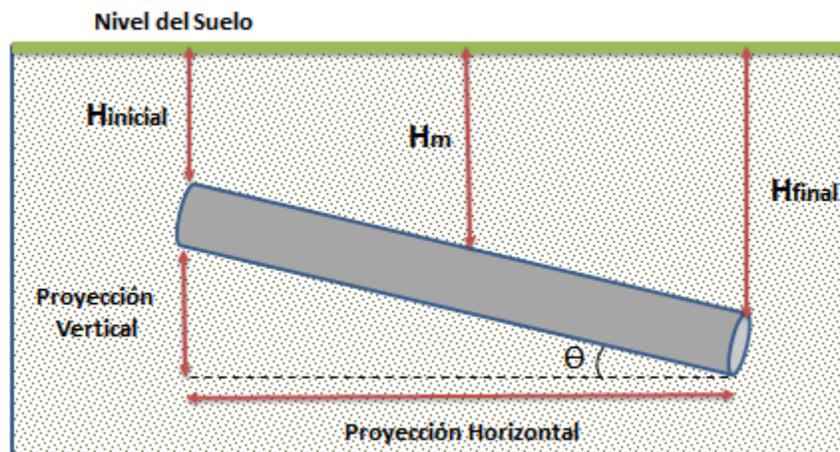


Figura 3.4. Esquema de un tramo de tubería

Dado que el volumen de excavación que se forma es una cuña, resulta ser una buena aproximación tomar una profundidad promedio, denotada por H_m . Esta profundidad resulta de la Ecuación 3.5.

$$H_m = \frac{H_{inicial} + H_{final}}{2} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde $H_{inicial}$ y H_{final} representan la diferencia entre la cota del terreno y la cota clave en cada uno de los puntos analizados respectivamente, medidos en metros.

- *Volumen de excavación para la instalación de la tubería*

El volumen de tierra que debe ser removido para realizar la instalación de la tubería, mostrado en la Figura 3.5, tiene la geometría de una cuña, haciendo necesario para su cálculo el conocimiento de la proyección vertical y horizontal de la tubería, así como de otras dimensiones especificadas a continuación.

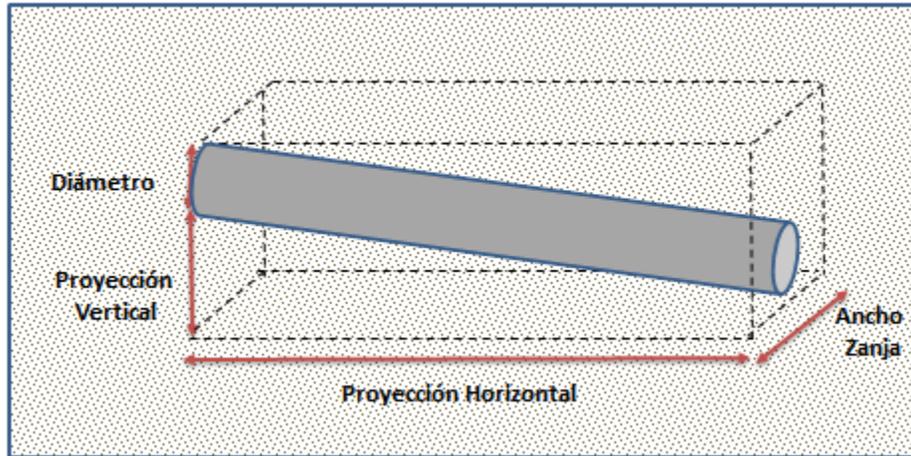


Figura 3.5. Volumen de Tierra asociado a la instalación de la tubería.

$$Proy.Vertical = L * \sin(\theta) + d \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$Proy.Horizontal = L * \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde el ángulo formado por la tubería con la horizontal (θ) se calcula utilizando la Ecuación 3.8.

$$\theta = \tan^{-1}(S) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

De acuerdo con el Manual Técnico para Alcantarillados NOVALOC y NOVAFORT (PAVCO, 2011), el ancho de zanja debe ser igual al diámetro comercial de la tubería más 0.40 m repartidos de forma equitativa a cada lado de la tubería. Este requerimiento se puede ver en la Figura 3.6, concluyendo así que el ancho de la zanja está dado por la Ecuación 3.9.

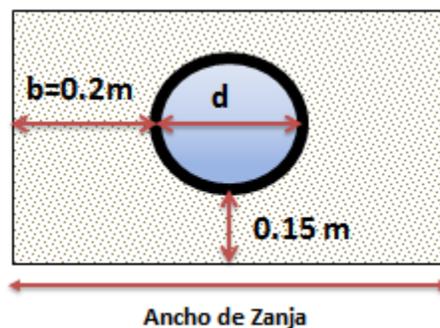


Figura 3.6. Ancho de Zanja según Manual Técnico para Alcantarillados NOVAFORT y NOVALOC. Tomado de (PAVCO, 2011)

$$w = 0.4 + d$$

Ecuación 3.9

Donde w es el ancho de zanja en metros, y d el diámetro también en metros.

Además del requerimiento anterior, también se debe excavar una profundidad adicional de 15 centímetros bajo la tubería con el fin de construirle un encamado para que esta se apoye. Por esta razón, la profundidad de la zanja aumenta como se muestra en la Figura 3.6.

Finalmente, al reunir las expresiones mostradas previamente, se obtuvo la expresión para calcular el volumen de tierra asociado a la instalación de la tubería, la cual es mostrada en la Ecuación 3.10.

$$V_{Exc.Tubería} = \frac{(L \sin \theta + d + 0.15) * L \cos \theta * (0.4 + d)}{2}$$

Ecuación 3.10

- *Volumen de Excavación Acumulado*

A medida que se van diseñando tramos de la red, es necesario incluir en la función de costos el volumen de tierra que se encuentra por encima de la cuña mostrada en la Figura 3.5, el cual se va acumulando a medida que se entierra la tubería.

Para el cálculo del volumen mencionado previamente, se adoptará la definición de Profundidad Promedio H_m dada la variabilidad que puede darse en las alturas en los diferentes tramos, y de acuerdo a este valor se decidirá cuál costo de excavación manual se utilizará. Lo anterior es resultado de que los costos tomados del IDU para esta actividad se encuentran en función de la profundidad de excavación, y por lo tanto se decidió incluir dos variables binarias, definidas como a y b , con el fin de describir adecuadamente esta función. Estas variables se definen como se muestra en las Ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$a = \begin{cases} 1 & \text{si } H_m < 2.0 \text{ m} \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases}$$

Ecuación 3.11

$$b = \begin{cases} 1 & \text{si } H_m > 2.0 \text{ m} \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases}$$

Ecuación 3.12

Utilizando las ecuaciones anteriores, cuando la profundidad promedio a la que se encuentra la tubería es menor a 2 metros, el costo de excavación se describe en la

Ecuación 3.13, y para el caso en que esta profundidad sea mayor a 2 metros, la expresión se describe en la Ecuación 3.14.

$$C_{Excavación < 2m} = 20119.53 * (V_{Exc.Tubería} + H_m * L * \cos(\theta)) * a \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$C_{Excavación > 2m} = 25938.52 * (V_{Exc.Tubería} + H_m * L * \cos(\theta)) * b \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Finalmente, la expresión que describirá los costos de excavación para un sistema de drenaje urbano será la mostrada en la Ecuación 3.15.

$$C_{Excavación} = (20119.53 * a + 25938.52 * b) * (V_{Exc.Tubería} + H_m * L * \cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Donde:

$C_{Excavación}$ = Costo Total de Excavación para el Tramo analizado [\$/COP]

3.2.2.2 Costos de Relleno

El relleno de la zanja es un proceso necesario luego que la tubería de alcantarillado es instalada, siendo el material empleado el mismo que fue extraído en la excavación sometido a un procedimiento de extendido, humedecimiento y compactación (IDU, 2012). Por esta razón, se utilizó la Lista de Precios de Referencia del IDU para el año 2012 para plantear una expresión que describa los costos de llevar a cabo este procedimiento.

En primer lugar, se debe calcular el volumen total de excavación de la zanja mediante la expresión:

$$V_{Total} = (V_{Exc.Tubería} + H_m * L * \cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Dado que luego de excavar la zanja, todo este volumen de tierra se debe volver a poner en su sitio excepto aquel asociado con el espacio que ocupa la tubería, se debe restar el volumen de tierra asociado con esta, el cual se describe en la Ecuación 3.17.

$$V_{Tubería} = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) * (L * \cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Por consiguiente, el costo de relleno se obtendrá al multiplicar el costo obtenido del IDU (Ver Tabla 3.5) por el volumen de relleno, es decir cuando al volumen total se le resta el de la tubería.

Actividad	Unidades	(\$COP)
Relleno Para Redes en Material Seleccionado Proveniente de la Excavación (Extendido, Humedecimiento y Compactación)	m ³	18,125.89

Tabla 3.5. Costo de Relleno para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012)

Finalmente, esta expresión se muestra en la Ecuación 3.18.

$$C_{Relleno} = 18125.89 * \left[V_{Exc.Tubería} + H_m * L * \cos(\theta) - \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) * (L * \cos(\theta)) \right] \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Donde el Costo de Relleno para cada tramo se encuentra en Pesos Colombianos [\$COP].

3.2.2.3 Costos de Entibado

El entibado se refiere al conjunto de tableros apuntalados con el fin de impedir el derrumbe de las paredes de la zanja excavada para instalar la tubería de alcantarillado (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 1999). Esta estructura puede hacerse en madera o en metal, y debe ser capaz de suministrar una resistencia suficiente al cortante y a la flexión que generan los empujes laterales del terreno (EAAB, 2006).

Dentro de los entibados existen dos categorías: Los Continuos (EC) y los Discontinuos (ED), y se clasifican como 1 o 2 si estos son hechos de madera (1) o si tienen paredes metálicas (2). Para la instalación de alcantarillados se sugiere el uso de un entibado tipo ED-1 como el que se muestra en la Figura 3.7. Este tipo de entibado se caracteriza por ser construido de forma discontinua en madera, basado en largueros, puntales y codales en madera, o pueden ser metálicos. Estos elementos descritos previamente deben satisfacer los siguientes requerimientos (EAAB, 2003):

- *Largueros*: Vigas en madera con sección mínima de 0.10 x 0.20 x 3.00 metros.
- *Puntales*: Tablas rectangulares colocadas verticalmente cuya sección mínima es de 0.04 x 0.20 metros, dejando espacios libres de máximo 0.20 metros.
- *Codales*: Son postes metálicos de 4” de diámetro mínimo, o 0.12 metros si son en madera, distribuidos en niveles con separación vertical máxima de 1.60 metros y separación horizontal máxima de 1.60 m en la zona central del larguero, y 1.40 m en los extremos de este.

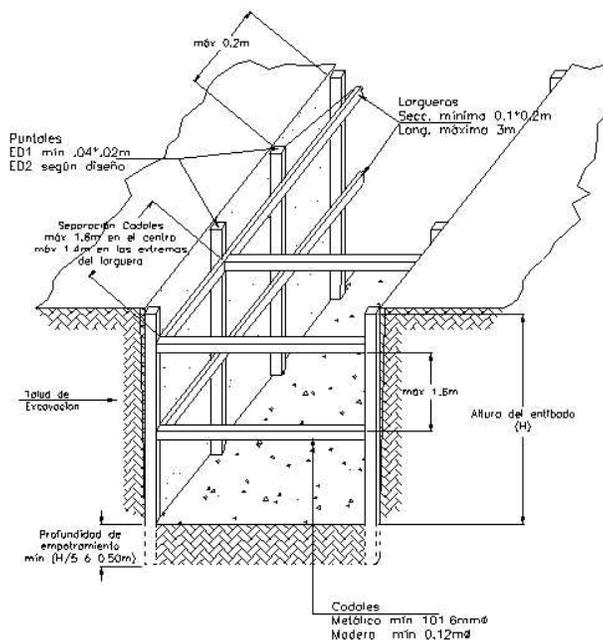


Figura 3.7. Entibado tipo ED-1. Tomado de (EAAB, 2003)

De acuerdo con los Requisitos de Higiene y Seguridad Industrial para Excavaciones, esta estructura debe ser instalada en la zanja cuando su profundidad sea mayor de 1.20 metros, verificando que no se utilicen tablonces de madera de más de dos metros de longitud, y que estos se encuentren en perfectas condiciones, es decir que no estén astillados, que no tengan puntillas y que no se encuentren en estado de descomposición (EAAB, 2000).

Ahora bien, una vez conocidas las especificaciones técnicas de los entibados, se realizará el planteamiento de la función de costo asociada con esta actividad. Para este fin, se utilizó el Listado de Precios de Actividades en Obra del IDU válido desde Agosto del 2012, en donde se obtuvo la información mostrada en la Tabla 3.6.

Actividad	Unidades	(\$COP)
Entibado Tipo ED-1, Discontinuo en Madera. (Incluye Suministro e Instalación)	m ²	23,033.89

Tabla 3.6. Costo de Entibado para Redes. Tomado y Modificado de (IDU, 2012)

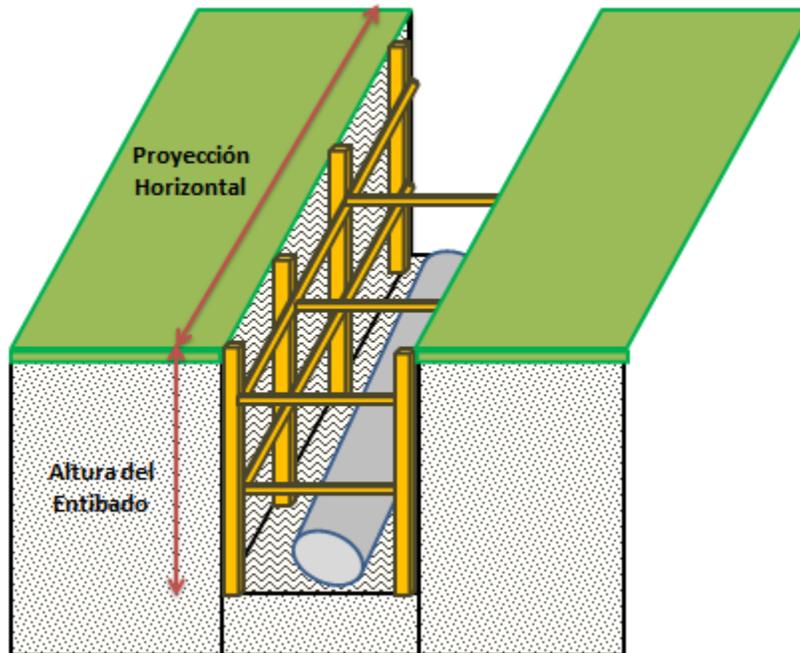


Figura 3.8. Esquema del Entibado de una Zanja

En la Figura 3.8 se muestra el esquema típico de un entibado ED-1. La proyección horizontal del tramo se puede obtener mediante la Ecuación 3.7, mostrada previamente, y la altura utilizada en esta función de costo se puede describir utilizando la Ecuación 3.19.

$$Z = \text{Cota Terreo} - \text{Cota Batea} + 0.15 \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Donde Z es la profundidad de la zanja, medida en metros, y se le debe sumar 15 centímetros bajo la cota de Batea de la tubería por razones constructivas.

Dada la normatividad del Acueducto en la que se estipula que el entibado debe ser utilizado para zanjas cuya profundidad sea mayor a 1.20 metros, se debe utilizar una variable binaria para modelar esta condición. Por lo anterior, se define la variable c , la cual indica cuando se debe utilizar en entibado con base en la profundidad de excavación. Esta variable se define en la Ecuación 3.20.

$$c = \begin{cases} 1 & \text{si } Z > 1.20 \text{ m} \\ 0 & \text{d.l.c} \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Finalmente, se plantea la función de costo para el entibado de la excavación, resultando así la Ecuación 3.21.

$$C_{Entibado} = 23033.89 * (L \cos(\theta) * Z * 2) * c$$

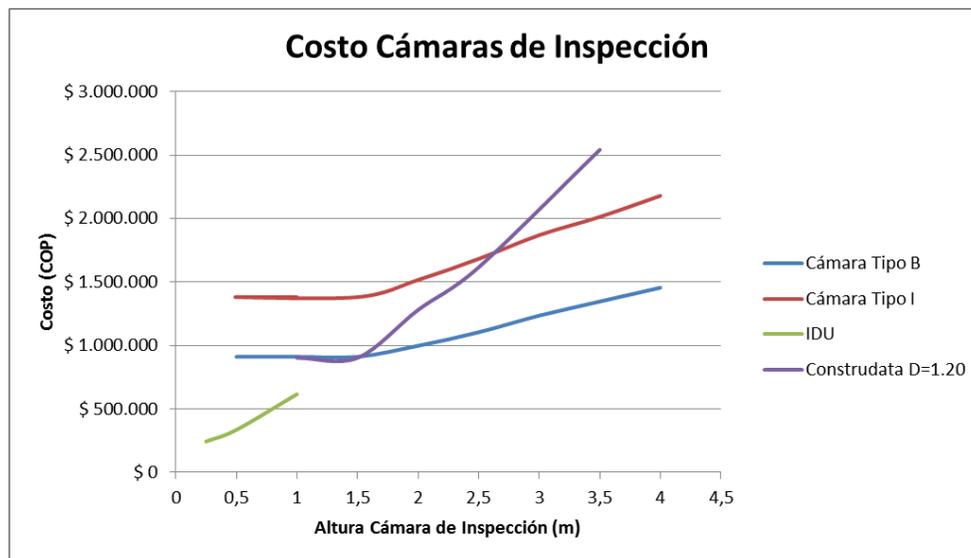
Ecuación 3.21

Donde el Costo de Entibado para cada tramo se encuentra en Pesos Colombianos [\$COP].

3.2.2.4 Costos de las Cámaras de Inspección

Al igual que lo hizo Swamee en su metodología planteada para optimizar el diseño de alcantarillados, se consideró importante incluir los costos asociados con la cámara de inspección que irá en la conexión de dos tuberías de la red.

Para lograr plantear una ecuación que describiera los costos asociados con las cámaras de inspección se recopiló información de diferentes fuentes tales como (IDU, 2012), (Gobernación del Valle del Cauca, 2012) y (Construdata, 2011). Dada que esta información se encontraba en función de la altura de la cámara, se graficaron los datos de la profundidad de está contra sus respectivos costos obteniendo así las curvas de costo mostradas en la Gráfica 3.2.



Gráfica 3.2. Curvas de Costo para la Cámara de Inspección

Al aplicar regresiones polinómicas a cada una de las curvas de costo obtenidas, se obtuvieron las funciones y coeficientes de determinación R^2 mostrados en la Tabla 3.7.

Fuente de los Datos	Función Ajustada	R ²
Construdata	$y = 194014x^2 - 194118 + 856764$	0.9922
Cámara Tipo I – G. Valle del Cauca	$y = 61219x^2 - 28368x + 1x10^6$	0.9851
Cámara Tipo B – G. Valle del Cauca	$y = 44556x^2 - 32329x + 897558$	0.9871
IDU	$y = 258163x^2 + 174282x + 183737$	1.00

Tabla 3.7. Ecuaciones y Coeficientes de Determinación obtenidos con la Regresión Polinómica

De las ecuaciones mostradas previamente se decidió descartar las obtenidas con la información de la Gobernación del Valle del Cauca dado que no aplican a Bogotá, ni a Cundinamarca. La expresión obtenida con la información del IDU se decidió descartar porque, a pesar que posee un R² igual a 1, los datos obtenidos son muy pocos y se muestran atípicos respecto las demás curvas. Por lo anterior, se decide escoger la expresión calculada con la información de Construdata, la cual posee un buen R², y es aplicable a Bogotá y Cundinamarca (Construdata, 2011).

Dado que los costos encontrados en Construdata se encontraban en pesos de Mayo del 2011, se calculó un factor k el cual los convierte a pesos de Octubre del 2012 como lo hizo Ivonne Navarro en el 2009. Para llevar esto a cabo, se utilizó la variación del IPC desde Mayo del 2011 hasta Octubre del 2012, datos que fueron suministrados por (DANE, 2012), y se muestran en la Tabla 3.8.

Mes	2011	2012
Enero	0.91	0.73
Febrero	0.60	0.61
Marzo	0.27	0.12
Abril	0.12	0.14
Mayo	0.28	0.30
Junio	0.32	0.08
Julio	0.14	-0.02
Agosto	-0.03	0.04
Septiembre	0.31	0.29
Octubre	0.19	0.16
Noviembre	0.14	
Diciembre	0.42	
En año corrido	3.73	2.48

Tabla 3.8. Variación del IPC desde Mayo de 2011 hasta Octubre de 2012. Tomado de (DANE, 2012)

Al utilizar la Ecuación 3.22, se obtuvo que k es igual a 1.043.

$$k = (1 + IPC_{Mayo2011}) * (1 + IPC_{Junio2011}) * \dots * (1 + IPC_{Octubre2012}) = 1.043 \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Finalmente, la expresión que describe los costos de las cámaras de inspección se muestra en la Ecuación 3.23.

$$C_{\text{CámaraDeInspección}} = 1.043 * (194014H_{\text{final}}^2 - 194118H_{\text{final}} + 856764) \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Donde el Costo de la Cámara de Inspección que se debe colocar al final de cada tramo se encuentra en Pesos Colombianos [COP], siendo H_{Final} la profundidad de excavación al final de la tubería medida en metros.

3.2.3 Función de Costo Total

Para obtener la función para el costo total del diseño para un tramo de alcantarillado se deben utilizar las ecuaciones que se mostraron previamente, las cuales se resumen en la Tabla 3.9.

Costo de la Tubería [COP]	$C_{\text{Tubería}} = L * 622749d^{1.9799}$
Costo de la Excavación en sí [COP]	$C_{\text{Exc.}} = (20119.53 * a + 25938.52 * b)(V_{\text{Exc.Tubería}} + H_m * L * \cos(\theta))$
Costo de Relleno [COP]	$C_{\text{Relle.}} = 18125.89 \left[V_{\text{Exc.Tubería}} + H_m L \cos(\theta) - \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) (L \cos(\theta)) \right]$
Costo de Entibado [COP]	$C_{\text{Entibado}} = 23033.89 * (L \cos(\theta) * Z * 2) * c$
Cámara de Inspección [COP]	$C_{\text{C.DeInspección}} = 1.043 * (194014H_{\text{final}}^2 - 194118H_{\text{final}} + 856764)$

Tabla 3.9. Resumen de las Ecuaciones Propuestas

Al sumar estas ecuaciones, se obtiene la expresión mostrada en la Ecuación 3.24.

$$C_{\text{Tramo } i} = L * 622749d^{1.9799} + (20119.53 * a + 25938.52 * b)(V_{\text{Exc.Tubería}} + H_m * L * \cos(\theta)) + 18125.89 \left[V_{\text{Exc.Tubería}} + H_m L \cos(\theta) - \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) (L \cos(\theta)) \right] + 23033.89 * (L \cos(\theta) * Z * 2) * c + 1.043 * (194014H_{\text{final}}^2 - 194118H_{\text{final}} + 5985.9) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Donde el costo del i -ésimo tramo se encuentra en [COP].

Finalmente, para calcular los costos totales de la red de drenaje urbano se debe utilizar la Ecuación 3.25.

$$C_{Total Red} = \sum_{i=1}^n C_{Tramo i}$$

Ecuación 3.25

Donde tanto el Costo de cada tramo como el Costo Total de la Red de drenaje se encuentran en [COP], y n es el número total de tramos pertenecientes a esta.

3.3 Índice de Resiliencia en Redes de Alcantarillado

El Índice de Resiliencia es un criterio de confiabilidad de la red propuesto para RDAP, el cual, como ya se mencionó previamente, mide la capacidad de la red de seguir funcionando luego de presentar fallas gracias al superávit de potencia que esta posee. Para poder extender este concepto a las redes de drenaje urbano, fue necesario entender la definición de este concepto, el cual se muestra a continuación, y luego encontrar una expresión que transmitiera el mismo significado que en su aplicación original.

$$I_r = 1 - \frac{P_d}{P_d^*}$$

Ecuación 3.26

Resumiendo lo anterior, para poder plantear exitosamente el índice deseado se debe poder explicar la disipación de potencia en una red de alcantarillado a través de sus diferentes tramos, así como los valores máximos de esta.

En primer lugar, el concepto definido para expresar la potencia en la red de drenaje urbano será el de potencia unitaria, ya que este se encarga de cuantificar la energía que se pierde a lo largo de la red, y al ser unitaria hace referencia a cada tubo que compone el sistema (Copete Rivera, 2012).

$$PU = Q * S * L$$

Ecuación 3.27

Utilizando la Ecuación 3.27, se planteará la expresión para la potencia disipada en la red, la cual corresponde a la sumatoria de la potencia unitaria en el sistema. Lo anterior se resume en la Ecuación 3.28.

$$P_d = \sum_{i=1}^n Q_i S_i L_i$$

Ecuación 3.28

Donde Q_i hace referencia al caudal de diseño que pasa por la tubería i, S_i es la pendiente a la que se encuentra esta tubería, L_i es su longitud, y n el número total de tramos que componen la red de drenaje.

Para poder plantear una expresión que describa la potencia máxima que es capaz de disipar la red de drenaje urbano basta con observar la relación proporcional existente entre Potencia Unitaria y la pendiente de la tubería mostrada en la Ecuación 3.29. Esta relación, al ser proporcional, indica que entre mayor sea la pendiente, mayor será la potencia que disipe la red, por lo tanto se debe buscar una pendiente que pueda ser utilizada como referencia del valor máximo que esta variable puede tomar dentro del diseño, llegando así al concepto de **Pendiente Máxima**.

$$PU \propto S$$

Ecuación 3.29

La Pendiente Máxima (S_{max}) hace referencia a la máxima inclinación con la cual se puede instalar una tubería en un terreno determinado considerando los límites técnicos dados por el RAS 2000 para este fin (Ver Numeral 2.3.3). De acuerdo con lo anterior, para calcular esta pendiente se debe definir como parámetro la profundidad mínima a la cual se debe encontrar la tubería, la cual determinará la cota del límite superior permitido de la tubería aguas arriba, así como la profundidad máxima que se puede enterrar la tubería, parámetro que definirá la cota del límite inferior permitido aguas abajo del sistema. Una vez se tengan las cotas mencionadas, se deben restar y dividir por la longitud total de la red, obteniendo así la pendiente máxima. En la Figura 3.9 se pueden observar los parámetros relevantes en la definición de este concepto.

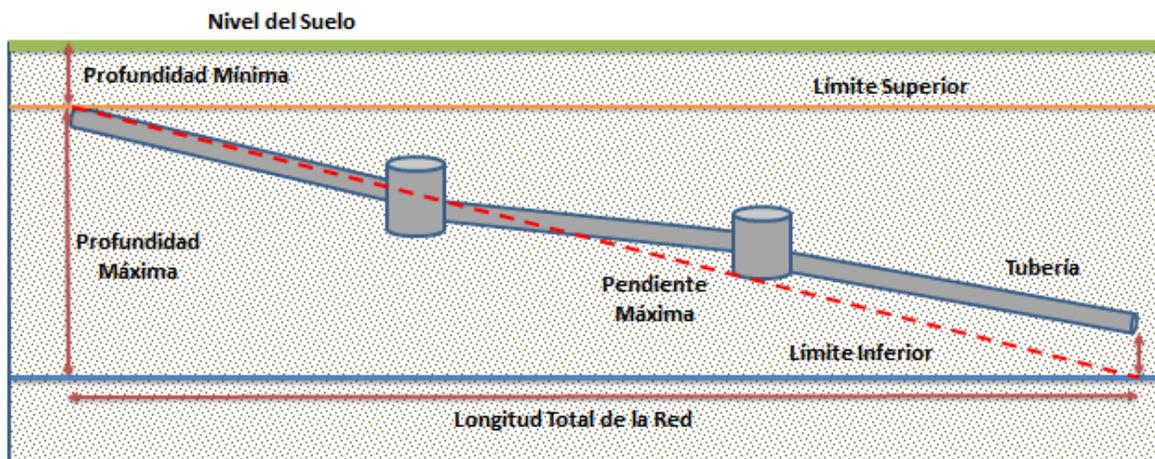


Figura 3.9. Esquema del Concepto de Pendiente Máxima

Una vez definida la pendiente máxima, es posible plantear una expresión para describir la máxima potencia que es capaz de disipar la red de drenaje. Esta es mostrada en la Ecuación 3.30.

$$P_d^* = \sum_{i=1}^n Q_{\max i} S_{\max i} L_{\max i} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Donde $S_{\max i}$ es la pendiente máxima de la red, $L_{\max i}$ la longitud del tramo i , y $Q_{\max i}$ es el caudal máximo que puede transportar la tubería i si esta es instalada con la pendiente máxima de la red. Este último se puede calcular mediante una comprobación de diseño dado que se conoce el diámetro obtenido de la etapa de diseño, la pendiente del fondo de la tubería (la cual será la máxima), la relación de llenado máxima, el material de la tubería y el fluido que será transportado.

Finalmente, utilizando las expresiones halladas previamente, se puede concluir que el Índice de Resiliencia para alcantarillados se define como:

$$I_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_i S_i L_i}{\sum_{i=1}^n Q_{\max i} S_{\max i} L_{\max i}} \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Reorganizando los términos:

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\max i} S_{\max i} L_{\max i} - \sum_{i=1}^n Q_i S_i L_i}{\sum_{i=1}^n Q_{\max i} S_{\max i} L_{\max i}} \quad \text{Ecuación 3.32}$$

4. RESULTADOS

En este capítulo se mostraran los resultados obtenidos para las redes de 15 diferentes ciudades hipotéticas al utilizar la función de costos y el índice de resiliencia propuestos en el capítulo anterior, modificando así el programa CIE-AGUA.

4.1 Resultados de las Ciudades Hipotéticas

Las ciudades hipotéticas se conformaron variando parámetros de la red como los caudales de diseño de esta, su topografía (Plana o Inclinada) o la longitud de las tuberías de los tramos que la conforman. En cuanto al material empleado en las redes de tuberías de dichas ciudades se utilizó PVC, cuya rugosidad absoluta es de 1.5×10^{-6} metros, y que se encuentra disponible en los diámetros comerciales mostrados en la Tabla 4.1.

Diámetros Comerciales (pulg.)	Diámetros Reales Internos (m)
6	0.151
8	0.203
10	0.253
14	0.32
18	0.36
20	0.40
24	0.595
27	0.671
30	0.747
33	0.823
36	0.899
39	0.974
42	1.05
45	1.127

Tabla 4.1. Listado de Diámetros Comerciales Disponibles

A continuación se mostraran los resultados a las 15 Ciudades analizadas, los cuales incluyen el perfil de estas, los costos totales asociados, el volumen de excavación total y la relación del índice de resiliencia con los costos y con la potencia unitaria.

4.1.1 Ciudad 1: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

La primera ciudad analizada hace referencia a una red compuesta por 10 tramos, y cuya topografía es plana. En la Tabla 4.2 se muestran las características de cada tramo que compone la red tales como el caudal de diseño en litros por segundo, su longitud en

metros y el número de pendientes propias disponibles al realizar el diseño. En el caso de la Ciudad 1, en el *Anexo A* se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pendientes propias disponibles asociadas con los diferentes tramos que componen la red.

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	20	120	2
2	30	105	3
3	40	105	3
4	50	105	4
5	60	120	4
6	70	120	5
7	80	75	5
8	90	120	6
9	100	105	6
10	110	105	6
Alternativas Posibles			1.555.200
Alternativas Viables			151

Tabla 4.2. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 1

Para la Ciudad 1 se obtuvieron en total 1.555.200 alternativas posibles, las cuales fueron calculadas mediante la Ecuación 4.1. De este número, tan solo 151 alternativas resultaron viables luego de verificar cuales de estas cumplían con todas las restricciones requeridas para el diseño de sistemas de alcantarillado.

$$NTA = \prod_{i=1}^n P_i = 2 * 3 * 3 * 4 * 4 * 5 * 5 * 6 * 6 * 6 = 1.555.200 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

En la Figura 4.1 se puede observar el perfil de la red de alcantarillado obtenida para la Ciudad 1, recordando que este diseño es el que tiene un menor costo total asociado de todas las alternativas posibles. En esta figura se muestra el terreno plano, el límite superior dado por el RAS 2000 el cual es de 1.20 metros, el límite inferior dado también por este reglamento el cual se encuentra 5.0 metros debajo del límite superior, la tubería y la lámina de agua que fluye en su interior para los 10 tramos que componen el sistema.

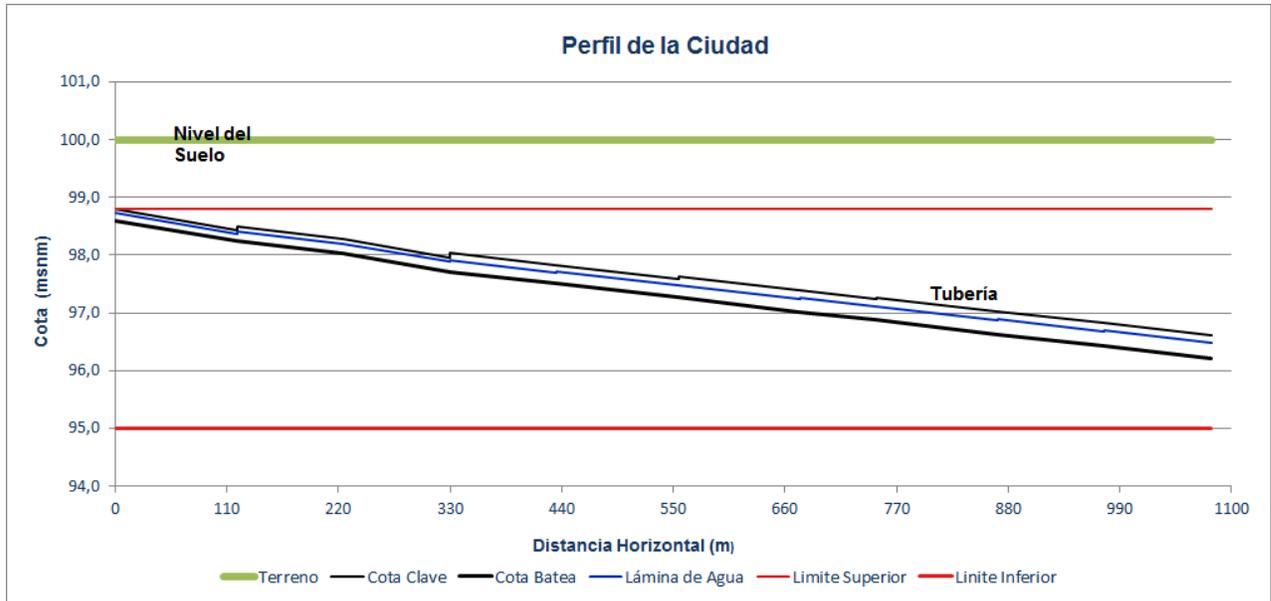


Figura 4.1. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados totales para la red de drenaje de la Ciudad 1. En esta tabla se observa el costo total de la red, la potencia unitaria total de esta, el índice de resiliencia calculado, y el volumen de tierra total que fue excavado.

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00352
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,146
Índice de Resiliencia (-)	0,6020
Volumen Total Excavado (m ³)	2760,412
Costo Total (\$COP)	\$ 346.584.296,32

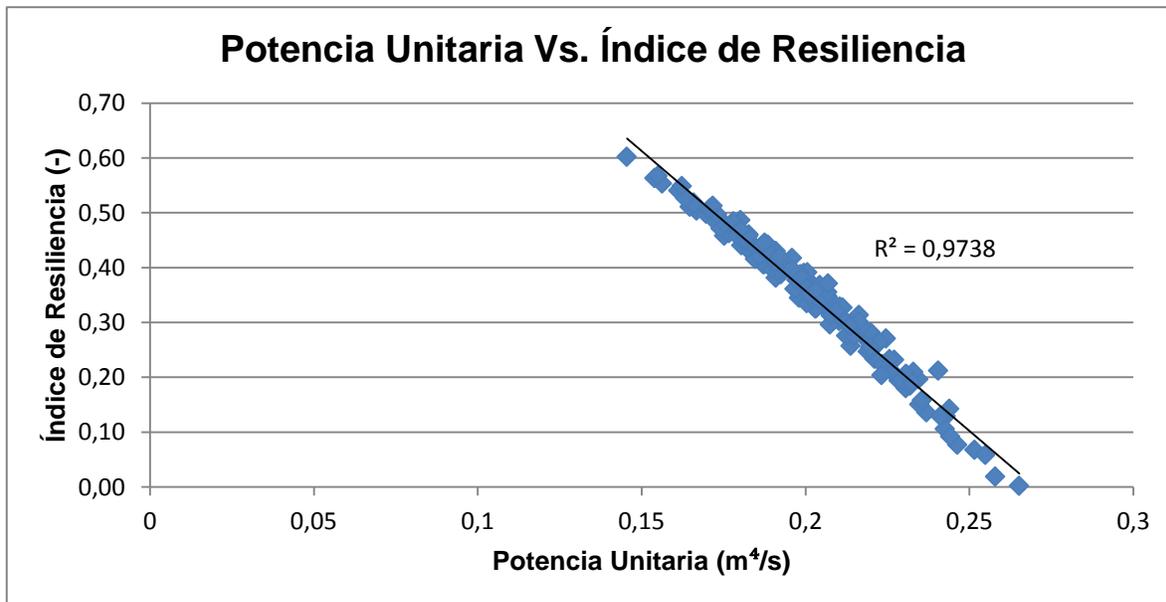
Tabla 4.3. Resultados Totales para la Ciudad 1

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos para cada tramo de la red. En esta tabla se muestra el diámetro que debe tener la tubería, la profundidad normal de flujo que se presentará en cada una de estas, la pendiente del fondo del conducto, la longitud de este, la potencia unitaria, el volumen excavado y el costo total para cada tramo.

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,129	0,0030	120	0,007	\$ 20.084.869,16	185,97
2	0,253	0,165	0,0020	105	0,006	\$ 21.893.627,47	185,45
3	0,253	0,173	0,0030	105	0,013	\$ 24.276.821,61	216,61
4	0,320	0,193	0,0020	105	0,011	\$ 30.627.210,30	237,70
5	0,320	0,220	0,0020	120	0,014	\$ 37.383.103,91	299,95
6	0,360	0,221	0,0020	120	0,017	\$ 42.096.031,00	327,12
7	0,360	0,242	0,0020	75	0,012	\$ 28.460.205,19	216,51
8	0,400	0,241	0,0020	120	0,022	\$ 48.832.568,35	372,48
9	0,400	0,259	0,0020	105	0,021	\$ 45.352.969,89	348,29
10	0,400	0,277	0,0020	105	0,023	\$ 47.576.889,44	370,34

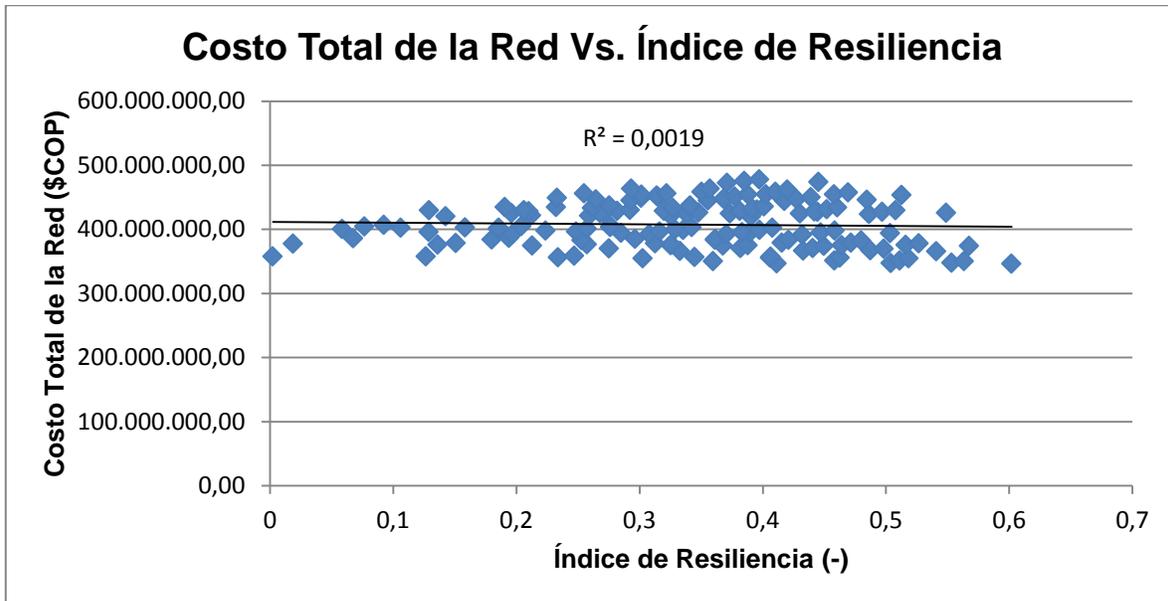
Tabla 4.4. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 1

En la Gráfica 4.1 se puede observar la relación del índice de resiliencia para todas las alternativas viables de la red, y su relación con la potencia unitaria de las mismas.



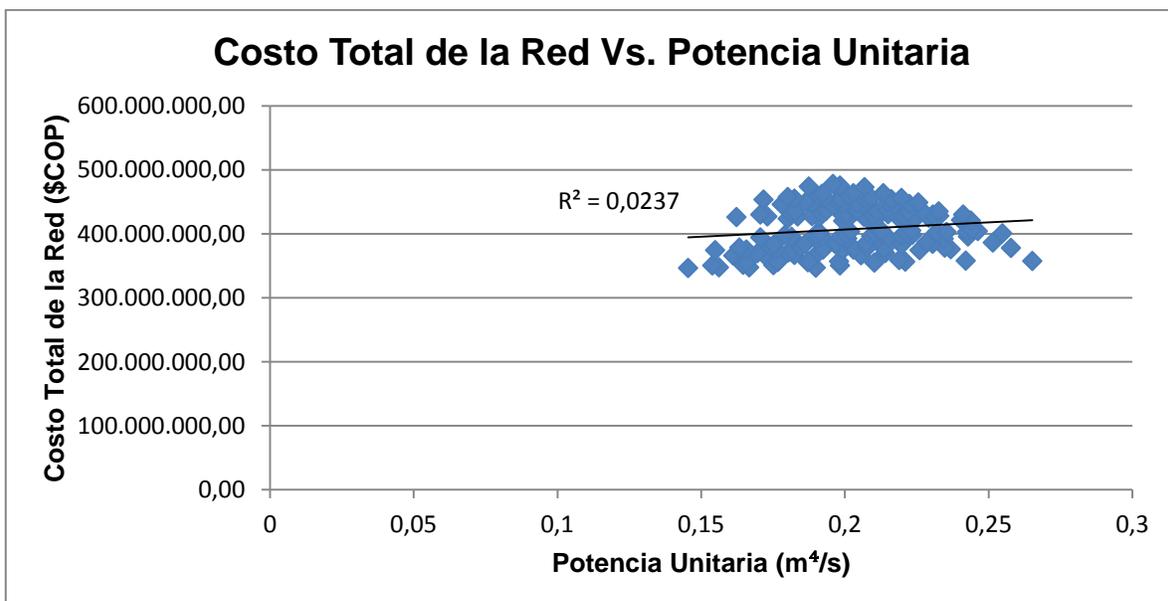
Gráfica 4.1. Relación entre Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1

En la Gráfica 4.2 se puede observar la relación de los costos totales de la red para todas las alternativas viables, y su relación con el índice de resiliencia de las mismas.



Gráfica 4.2. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1

Finalmente, en la Gráfica 4.3 se puede observar la relación existente entre los costos totales de la red para todas las alternativas viables, y su relación con la potencia unitaria total de las mismas.



Gráfica 4.3. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1

4.1.2 Ciudad 2: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.1%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	20	120	2
2	30	105	3
3	40	105	3
4	50	105	4
5	60	120	4
6	70	120	5
7	80	75	5
8	90	120	6
9	100	105	6
10	110	105	6
Alternativas Posibles			1.555.200
Alternativas Viables			353

Tabla 4.5. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 2

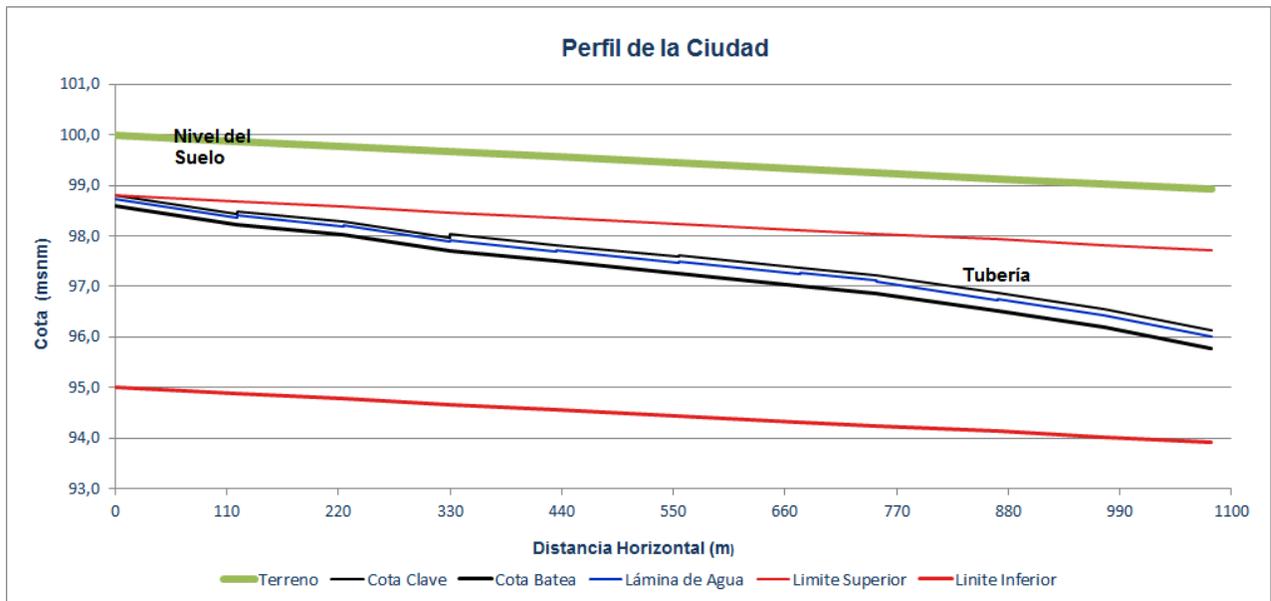
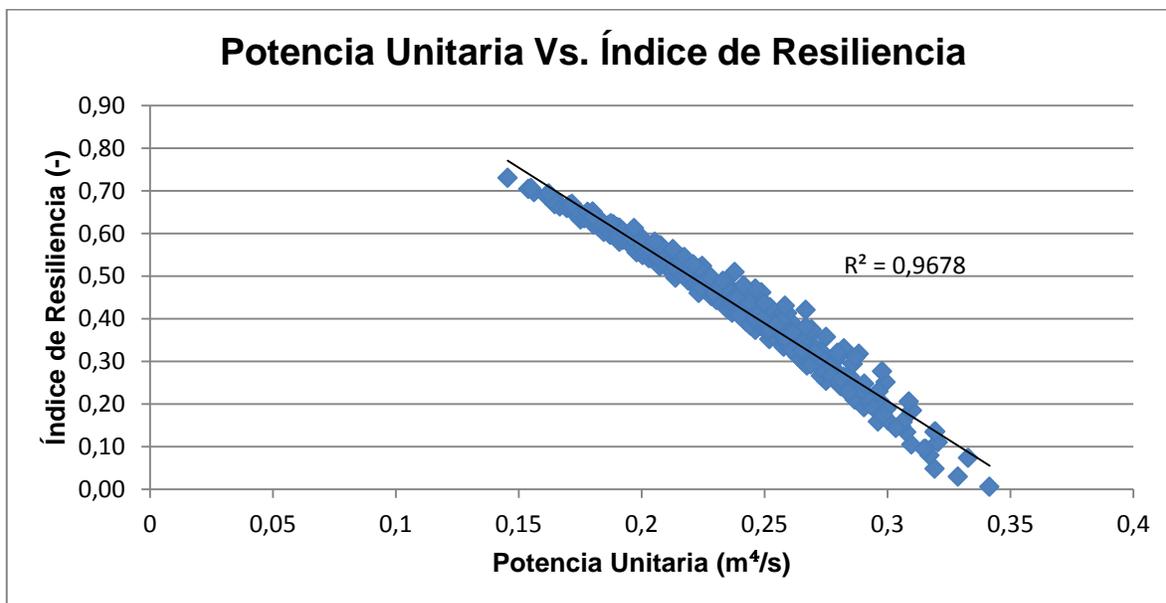


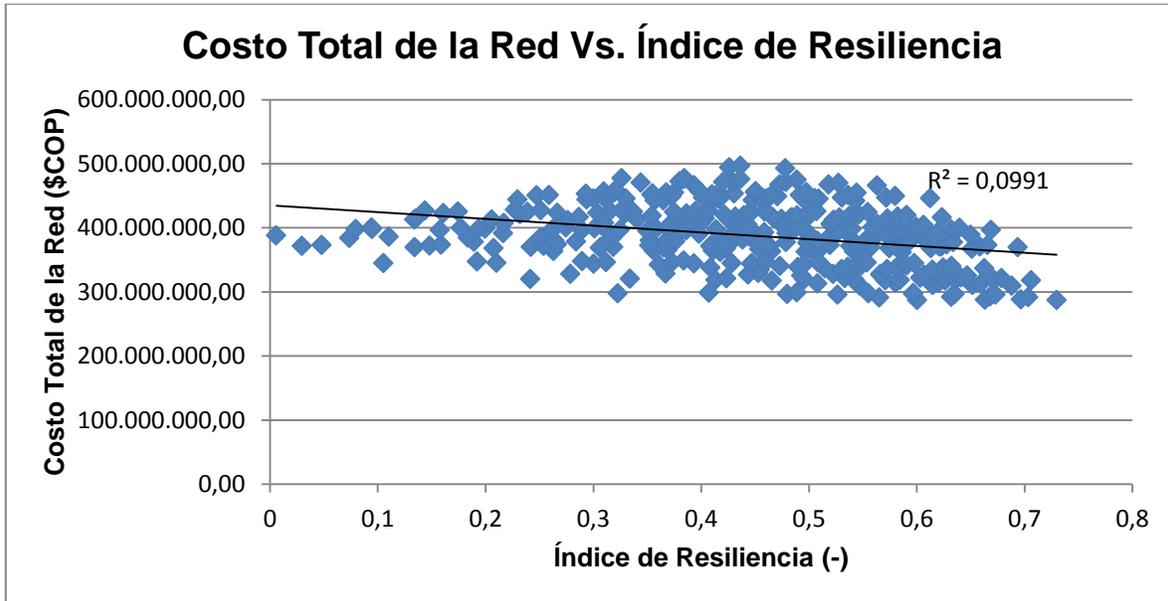
Figura 4.2. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 2

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,129	0,0030	120	0,007	\$ 19.760.949,49	178,77
2	0,253	0,165	0,0020	105	0,006	\$ 20.519.630,29	167,34
3	0,253	0,173	0,0030	105	0,013	\$ 21.891.163,13	187,47
4	0,320	0,193	0,0020	105	0,011	\$ 25.821.697,38	197,54
5	0,320	0,220	0,0020	120	0,014	\$ 30.555.046,58	240,55
6	0,360	0,221	0,0020	120	0,017	\$ 33.775.776,13	253,32
7	0,360	0,242	0,0020	75	0,012	\$ 22.225.033,65	163,07
8	0,360	0,225	0,0030	120	0,032	\$ 38.161.164,19	289,39
9	0,360	0,243	0,0030	105	0,032	\$ 35.855.677,41	275,05
10	0,360	0,232	0,0040	105	0,046	\$ 38.541.587,94	306,80

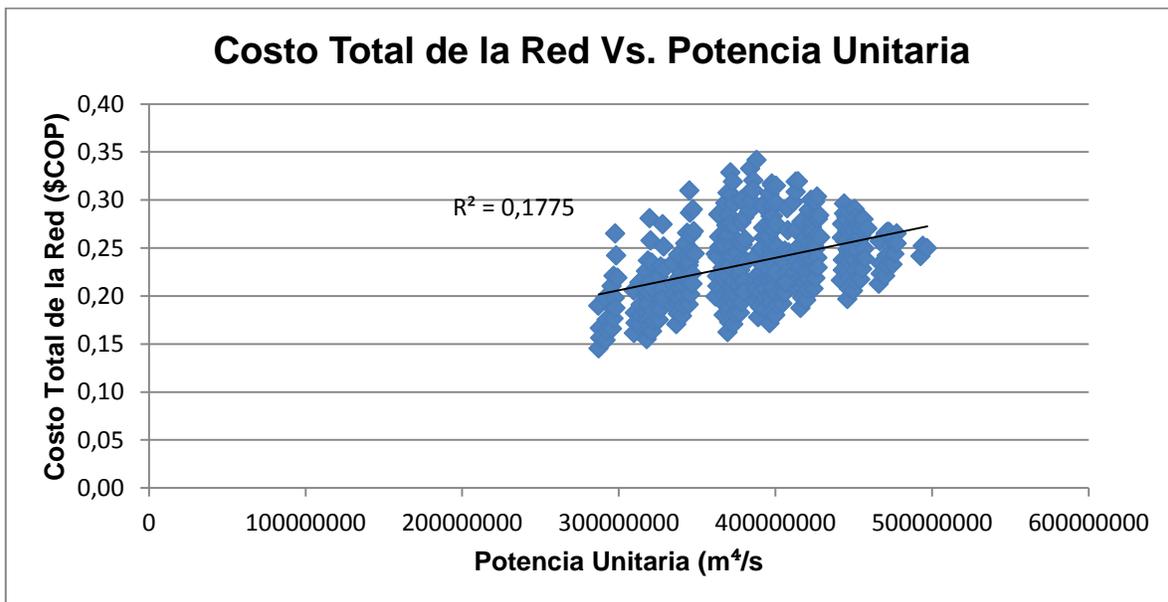
Tabla 4.6. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 2

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00452
Potencia Unitaria (m⁴/s)	0,190
Índice de Resiliencia (-)	0,6005
Volumen Total Excavado (m3)	2259,302
Costo Total (\$COP)	\$ 287.107.726,18

Tabla 4.7. Resultados Totales para la Ciudad 2

Gráfica 4.4. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 2



Gráfica 4.5. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 2



Gráfica 4.6. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 2

4.1.3 Ciudad 3: Red de 10 Tramos en Topografía Inclclinada de 1%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	20	120	2
2	30	105	3
3	40	105	3
4	50	105	4
5	60	120	4
6	70	120	5
7	80	75	5
8	90	120	6
9	100	105	6
10	110	105	6
Alternativas Posibles			1.555.200
Alternativas Viables			31

Tabla 4.8. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 3

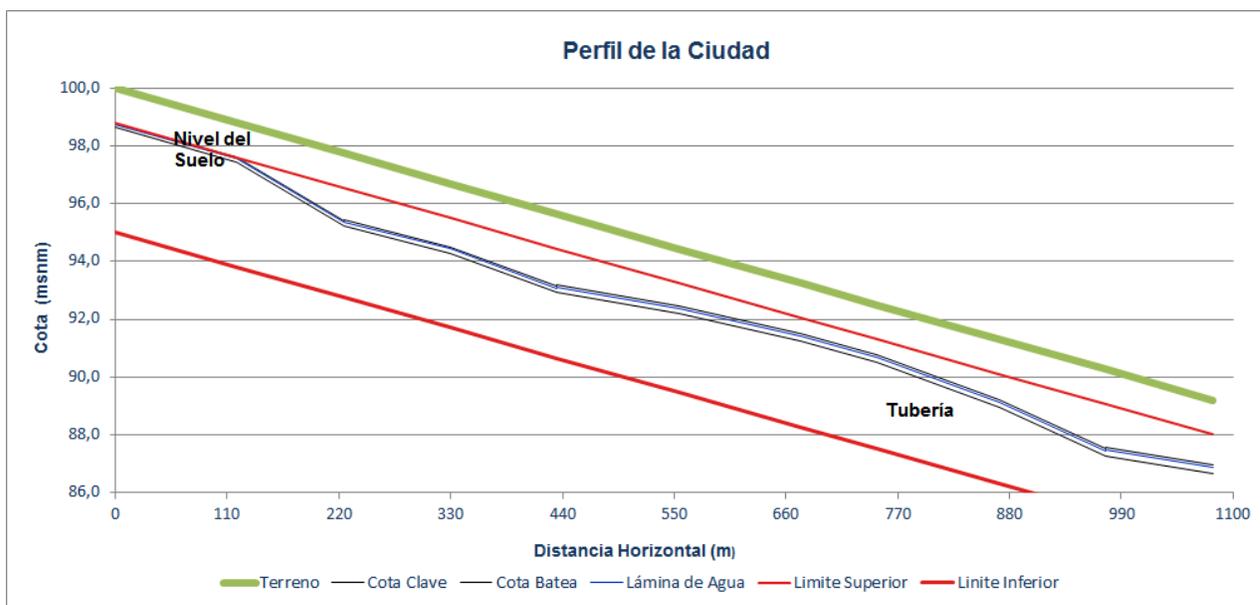
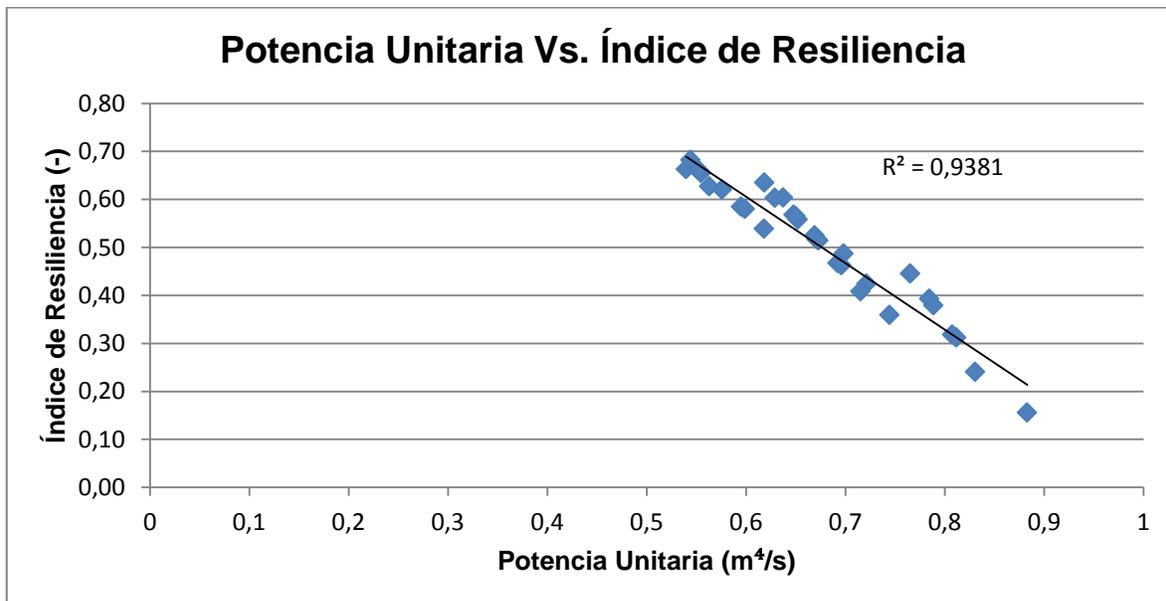


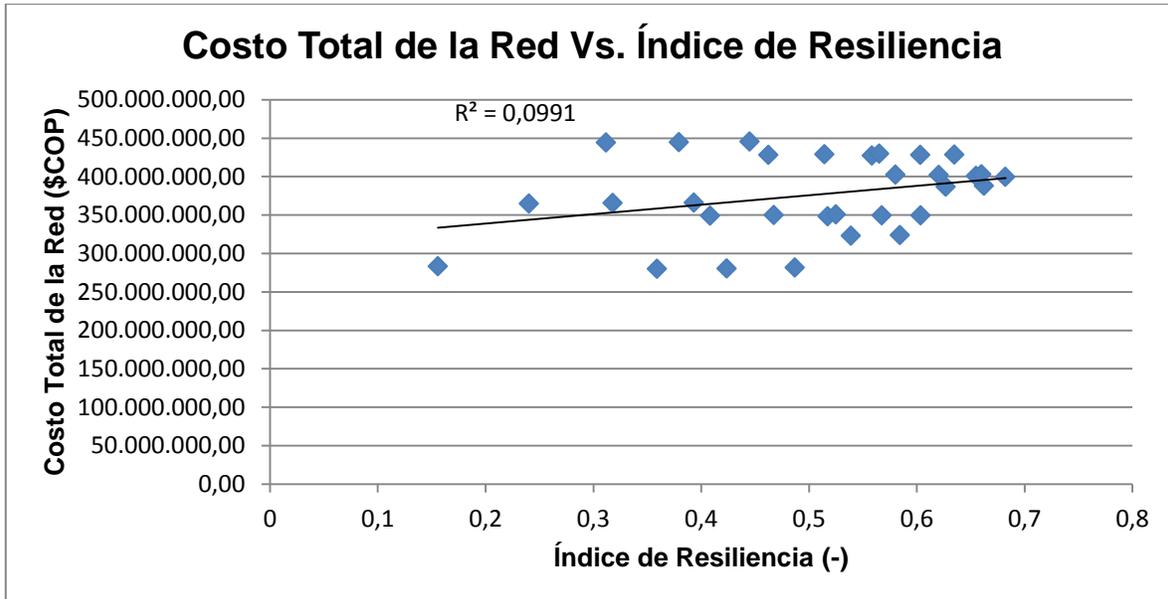
Figura 4.3. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 3

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,151	0,104	0,0100	120	0,024	\$ 18.376.131,49	188,67
2	0,151	0,104	0,0210	105	0,066	\$ 20.226.932,94	254,82
3	0,203	0,137	0,0090	105	0,038	\$ 29.223.280,66	272,70
4	0,203	0,139	0,0130	105	0,068	\$ 30.024.427,49	297,03
5	0,253	0,176	0,0060	120	0,043	\$ 35.640.966,06	304,97
6	0,253	0,176	0,0080	120	0,067	\$ 29.753.925,21	271,17
7	0,253	0,177	0,0100	75	0,060	\$ 17.659.827,87	155,34
8	0,253	0,174	0,0130	120	0,140	\$ 29.810.304,65	301,89
9	0,253	0,173	0,0160	105	0,168	\$ 32.525.389,55	320,27
10	0,320	0,220	0,0060	105	0,069	\$ 36.533.806,95	293,91

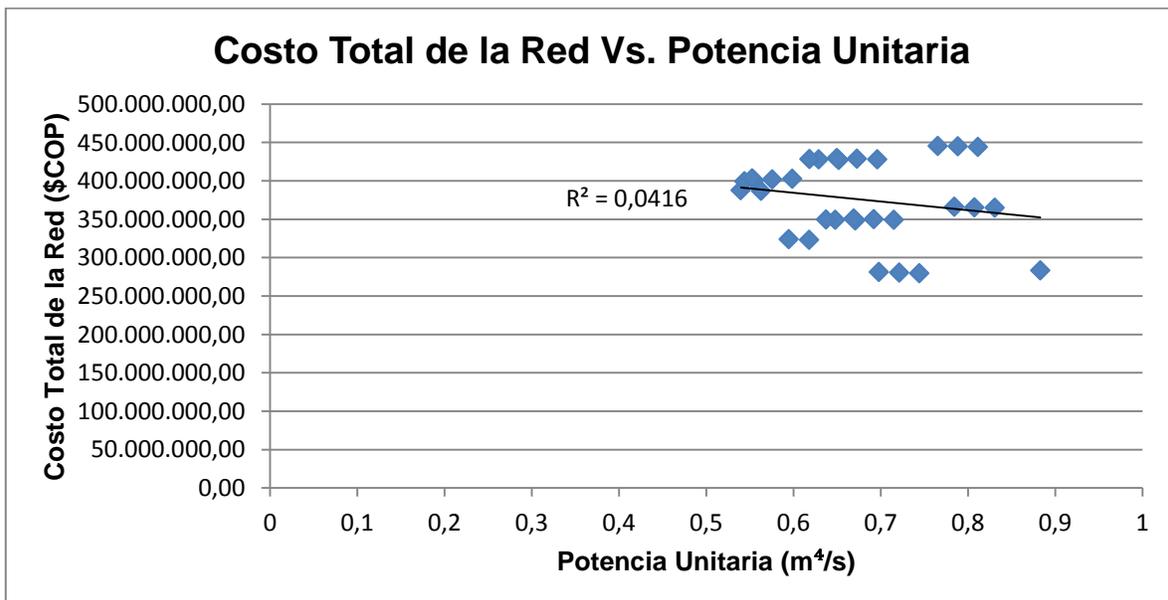
Tabla 4.9. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 3

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,01352
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,744
Índice de Resiliencia (-)	0,3589
Volumen Total Excavado (m ³)	2660,781
Costo Total (\$COP)	\$ 279.774.992,86

Tabla 4.10. Resultados Totales para la Ciudad 3

Gráfica 4.7. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 3



Gráfica 4.8. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 3



Gráfica 4.9. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 3

4.1.4 Ciudad 4: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	10	100	1
2	15	75	2
3	20	75	2
4	25	75	3
5	30	75	3
6	35	75	3
7	40	75	3
8	45	75	4
9	50	75	4
10	55	105	4
Alternativas Posibles			20.736
Alternativas Viables			59

Tabla 4.11. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 4

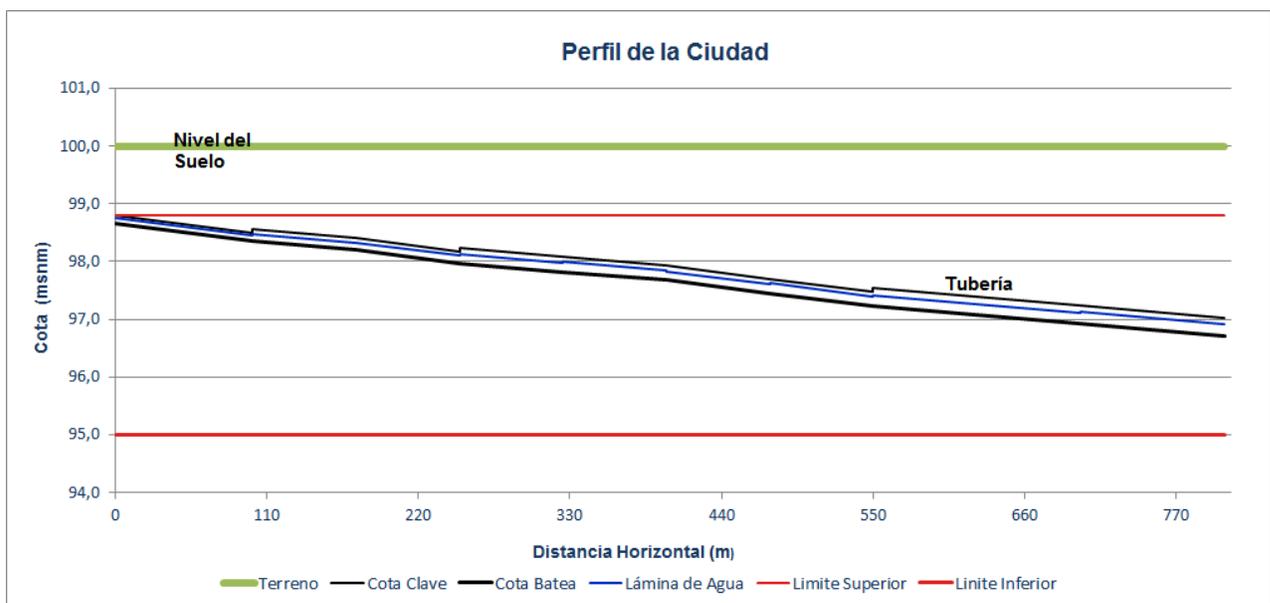
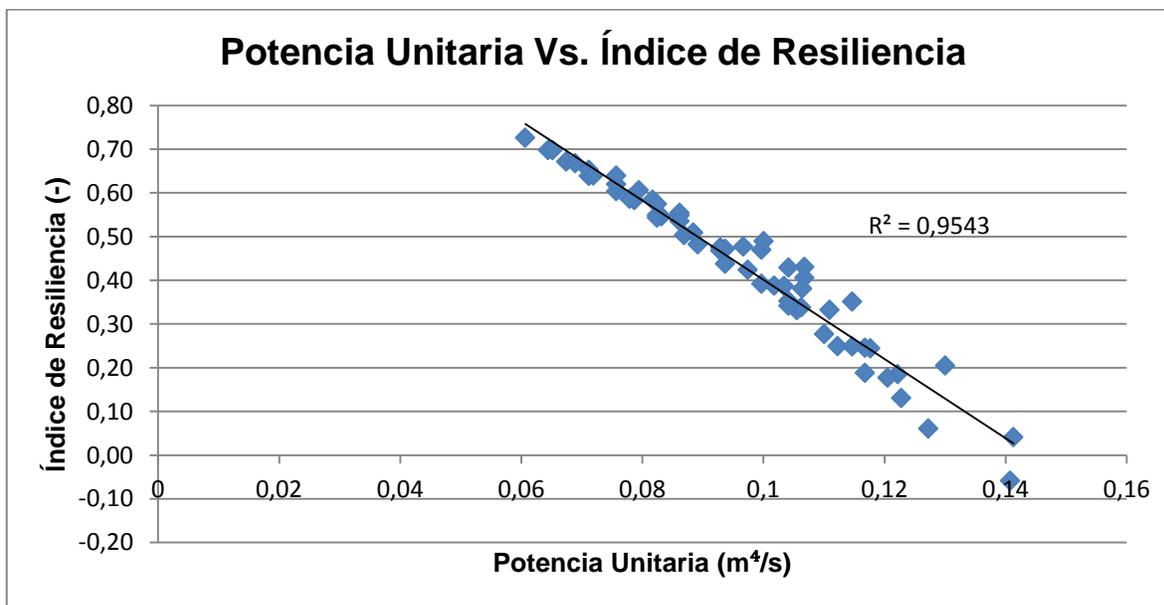


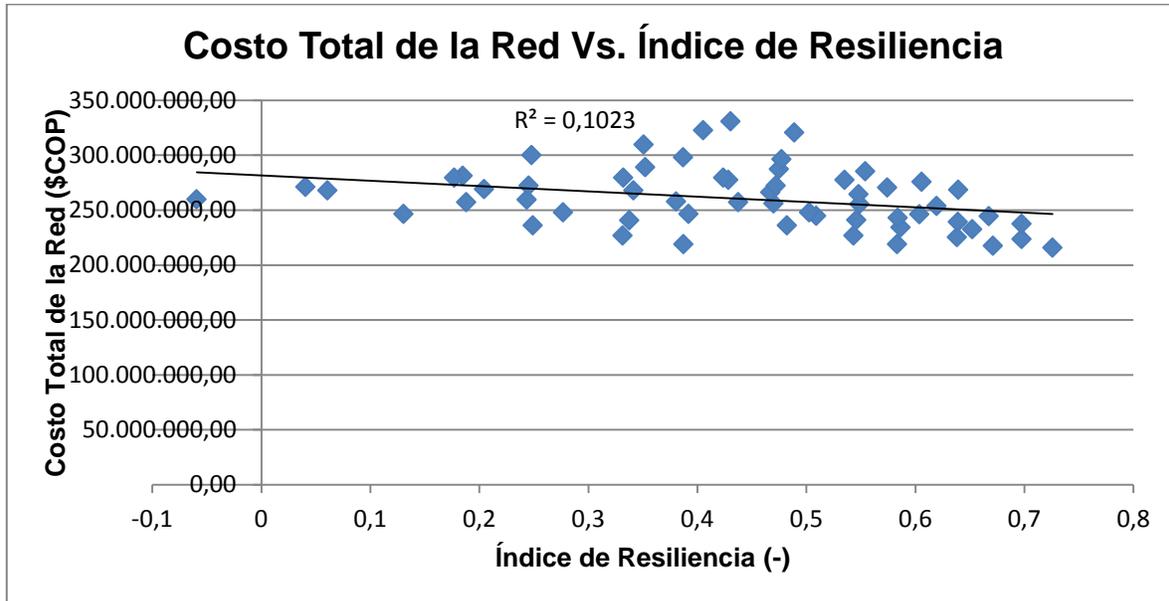
Figura 4.4. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 4

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,151	0,102	0,0030	100	0,003	\$ 15.198.812,18	147,43
2	0,203	0,123	0,0020	75	0,002	\$ 14.056.391,85	122,21
3	0,203	0,129	0,0030	75	0,005	\$ 15.287.553,28	137,97
4	0,253	0,146	0,0020	75	0,004	\$ 17.594.552,86	148,47
5	0,253	0,165	0,0020	75	0,005	\$ 18.633.999,39	159,72
6	0,253	0,157	0,0030	75	0,008	\$ 20.957.088,01	175,62
7	0,253	0,173	0,0030	75	0,009	\$ 22.652.020,36	192,49
8	0,320	0,181	0,0020	75	0,007	\$ 25.736.162,95	202,52
9	0,320	0,193	0,0020	75	0,008	\$ 26.882.536,36	213,77
10	0,320	0,206	0,0020	105	0,012	\$ 38.745.463,81	320,44

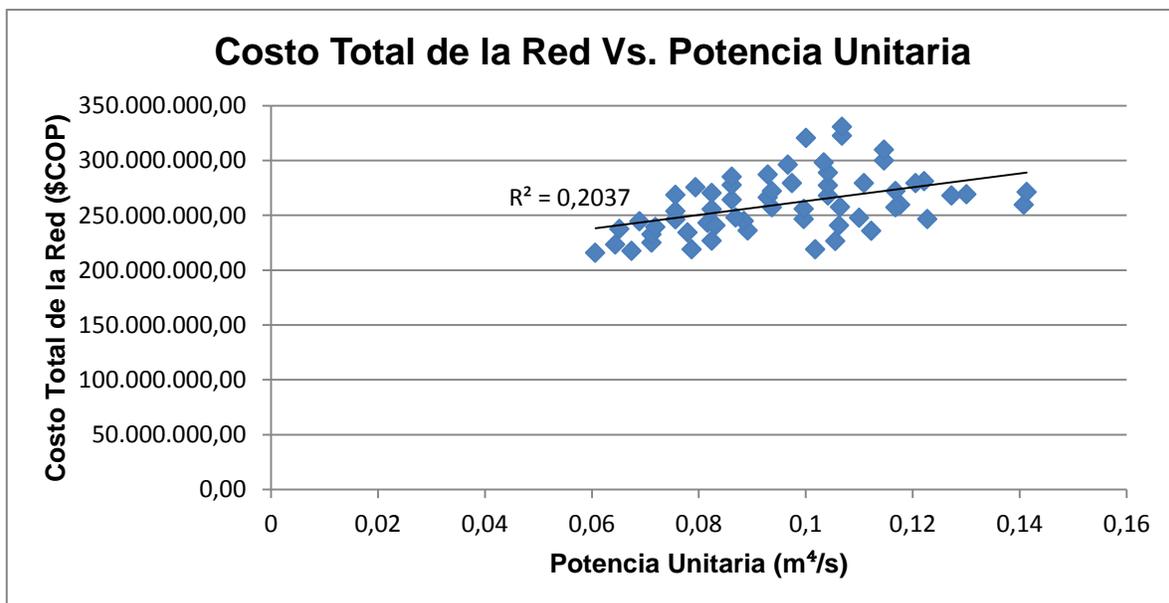
Tabla 4.12. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 4

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00472
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,061
Índice de Resiliencia (-)	0,7258
Volumen Total Excavado (m3)	1820,617
Costo Total (\$COP)	\$ 215.744.581,05

Tabla 4.13. Resultados Totales para la Ciudad 4

Gráfica 4.10. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 4



Gráfica 4.11. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 4



Gráfica 4.12. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 4

4.1.5 Ciudad 5: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 0.2%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	10	100	1
2	15	75	2
3	20	75	2
4	25	75	3
5	30	75	3
6	35	75	3
7	40	75	3
8	45	75	4
9	50	75	4
10	55	105	4
Alternativas Posibles			20.736
Alternativas Viables			94

Tabla 4.14. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 5

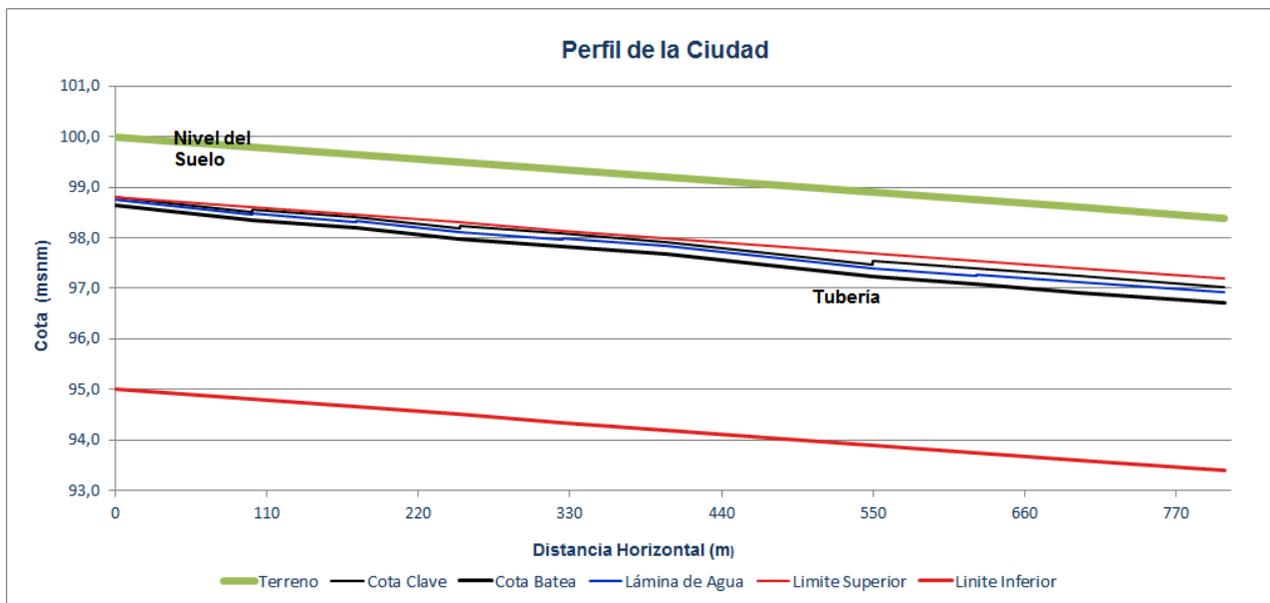


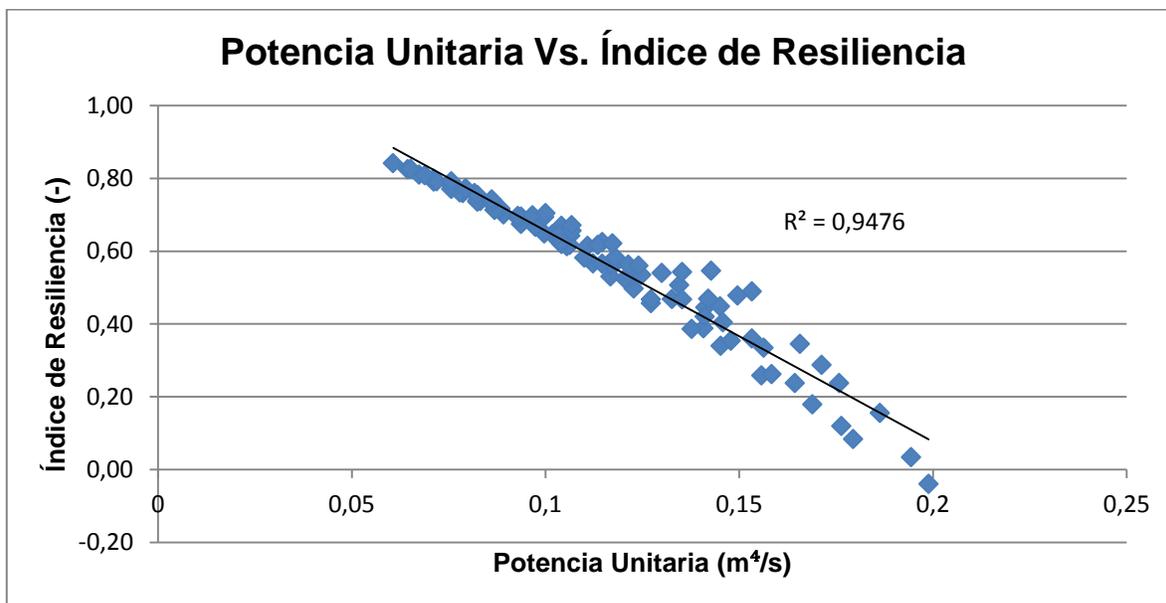
Figura 4.5. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 5

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,151	0,102	0,0030	100	0,003	\$ 14.743.531,19	137,43
2	0,203	0,123	0,0020	75	0,002	\$ 12.445.861,19	101,58
3	0,203	0,129	0,0030	75	0,005	\$ 12.642.131,08	106,09
4	0,253	0,146	0,0020	75	0,004	\$ 13.928.910,04	105,34
5	0,253	0,165	0,0020	75	0,005	\$ 13.928.912,03	105,34
6	0,253	0,157	0,0030	75	0,008	\$ 14.131.321,79	109,99
7	0,253	0,173	0,0030	75	0,009	\$ 14.632.459,32	115,62
8	0,320	0,181	0,0020	75	0,007	\$ 16.614.113,72	114,39
9	0,320	0,193	0,0020	75	0,008	\$ 16.614.115,72	114,39
10	0,320	0,206	0,0020	105	0,012	\$ 22.950.047,81	162,41

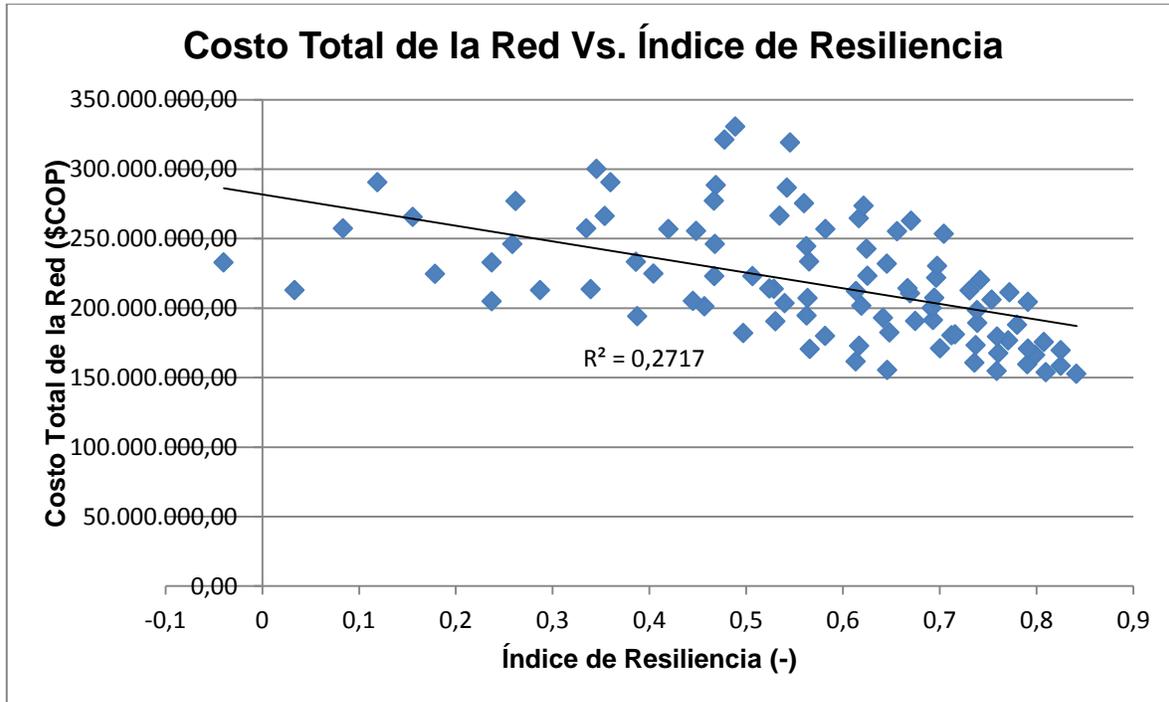
Tabla 4.15. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 5

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00672
Potencia Unitaria (m⁴/s)	0,061
Índice de Resiliencia (-)	0,8413
Volumen Total Excavado (m³)	1172,592
Costo Total (\$COP)	\$ 152.631.403,88

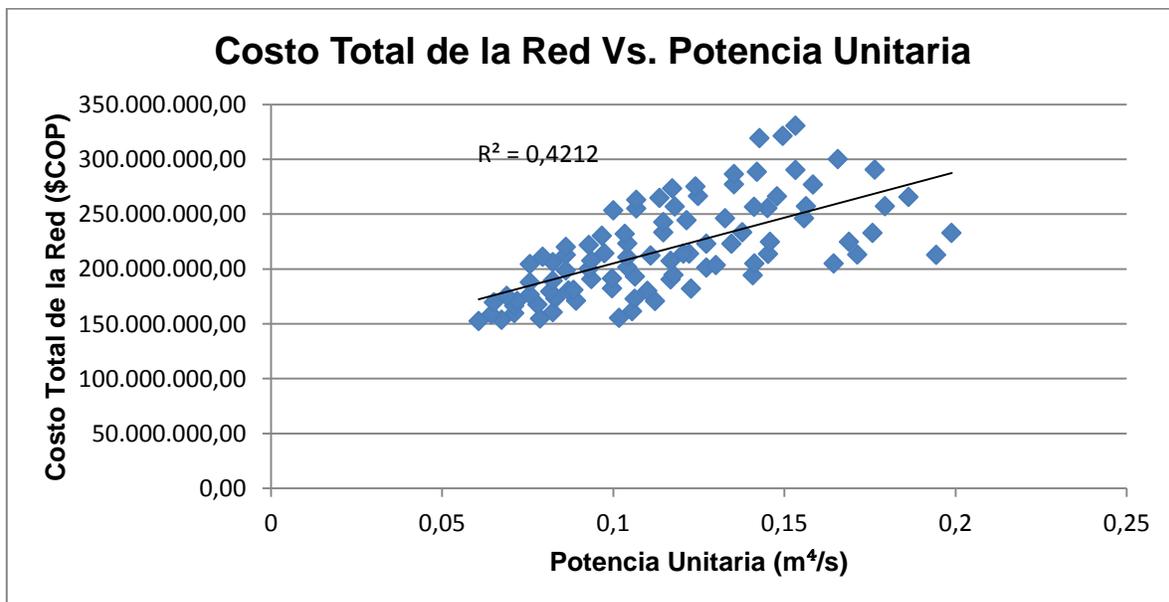
Tabla 4.16. Resultados Totales para la Ciudad 5



Gráfica 4.13. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 5



Gráfica 4.14. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 5



Gráfica 4.15. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 5

4.1.6 Ciudad 6: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	20	105	2
2	28	105	3
3	36	105	3
4	44	105	4
5	52	105	4
6	60	105	4
7	68	105	5
8	76	105	5
9	84	105	5
10	92	105	6
Alternativas Posibles			864.000
Alternativas Viables			147

Tabla 4.17. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 6

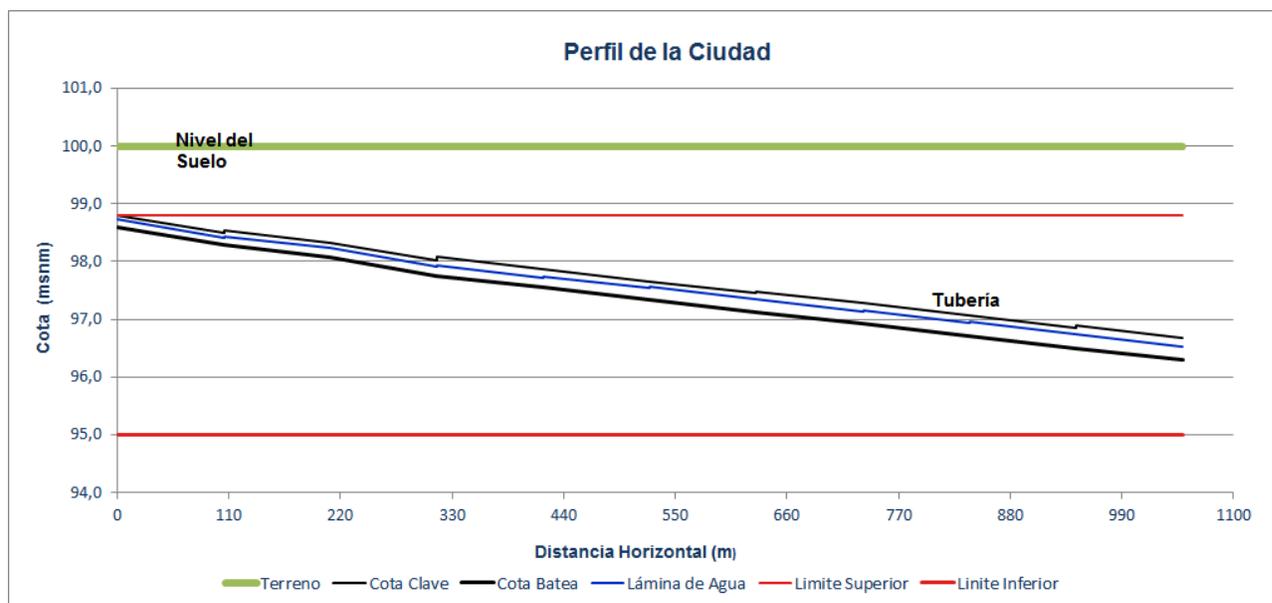


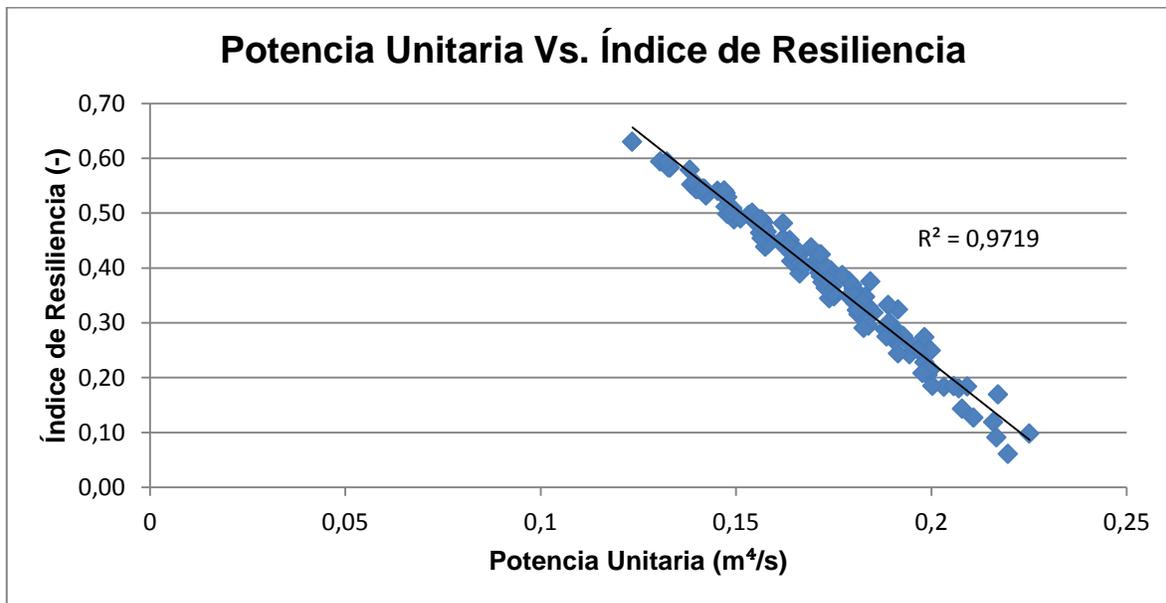
Figura 4.6. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 6

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,129	0,0030	105	0,006	\$ 17.544.307,96	158,94
2	0,253	0,157	0,0020	105	0,006	\$ 21.473.442,42	180,72
3	0,253	0,160	0,0030	105	0,011	\$ 23.850.899,70	211,89
4	0,320	0,178	0,0020	105	0,009	\$ 30.171.189,19	232,97
5	0,320	0,198	0,0020	105	0,011	\$ 32.306.294,06	255,02
6	0,320	0,220	0,0020	105	0,013	\$ 34.459.246,85	277,07
7	0,360	0,217	0,0020	105	0,014	\$ 38.300.538,76	297,63
8	0,360	0,234	0,0020	105	0,016	\$ 40.485.787,80	319,68
9	0,360	0,251	0,0020	105	0,018	\$ 42.688.884,76	341,73
10	0,360	0,229	0,0030	105	0,029	\$ 45.460.825,45	373,49

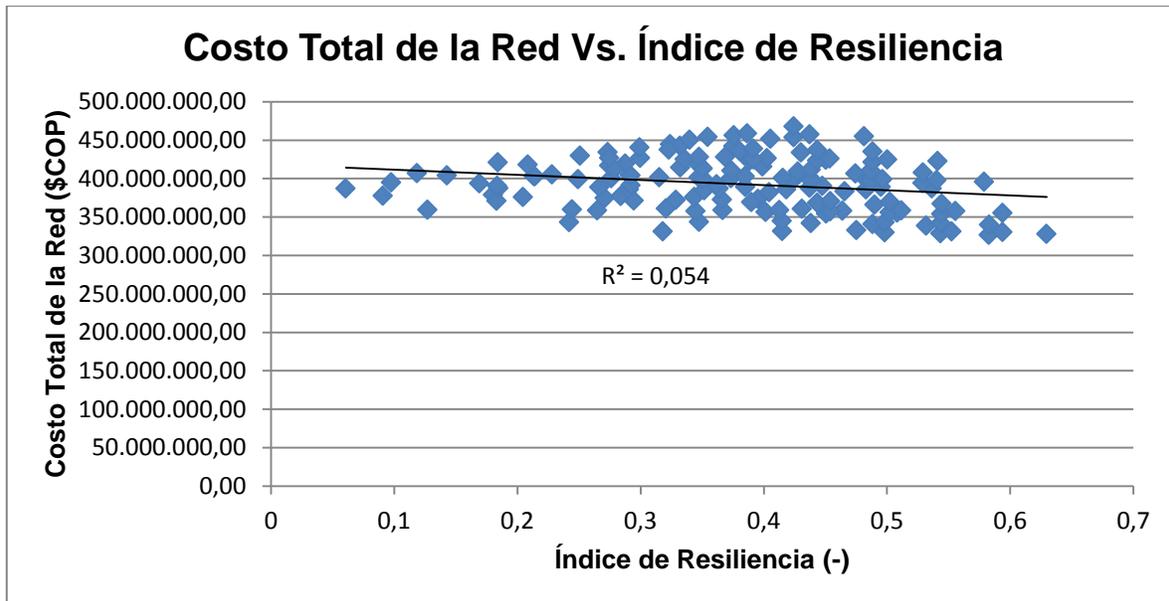
Tabla 4.18. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 6

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00362
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,133
Índice de Resiliencia (-)	0,5828
Volumen Total Excavado (m ³)	2649,154
Costo Total (\$COP)	\$ 326.741.416,94

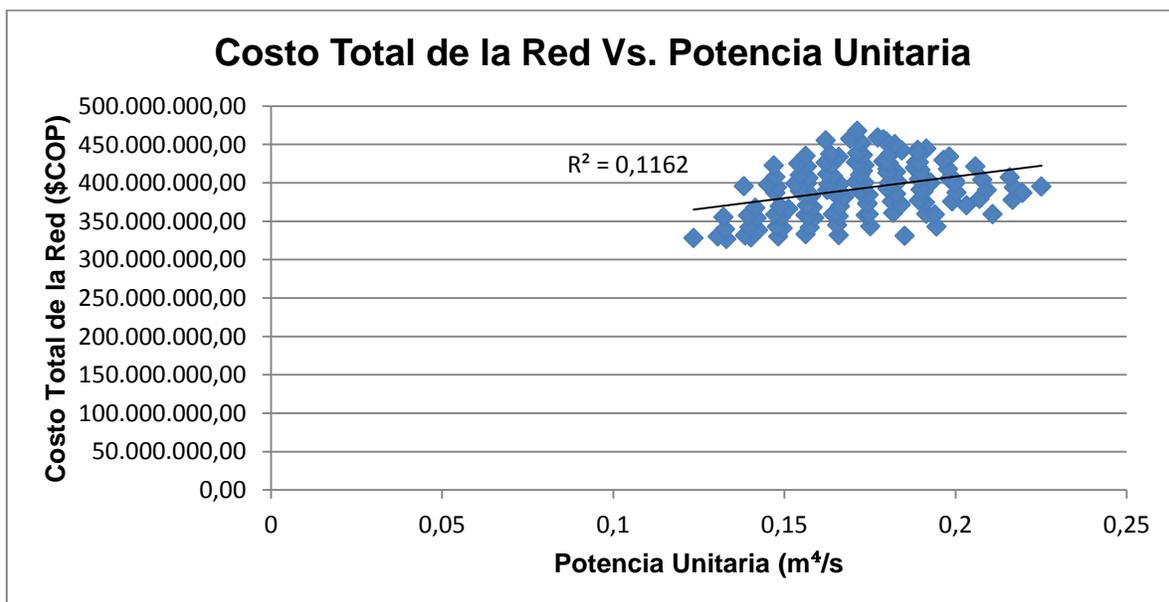
Tabla 4.19. Resultados Totales para la Ciudad 6



Gráfica 4.16. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 6



Gráfica 4.17. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 6



Gráfica 4.18. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 6

4.1.7 Ciudad 7: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 0.2%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	10	105	1
2	15	105	2
3	20	105	2
4	25	105	3
5	30	105	3
6	35	105	3
7	40	105	3
8	45	105	4
9	50	105	4
10	55	105	4
Alternativas Posibles			20.736
Alternativas Viables			73

Tabla 4.20. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 7

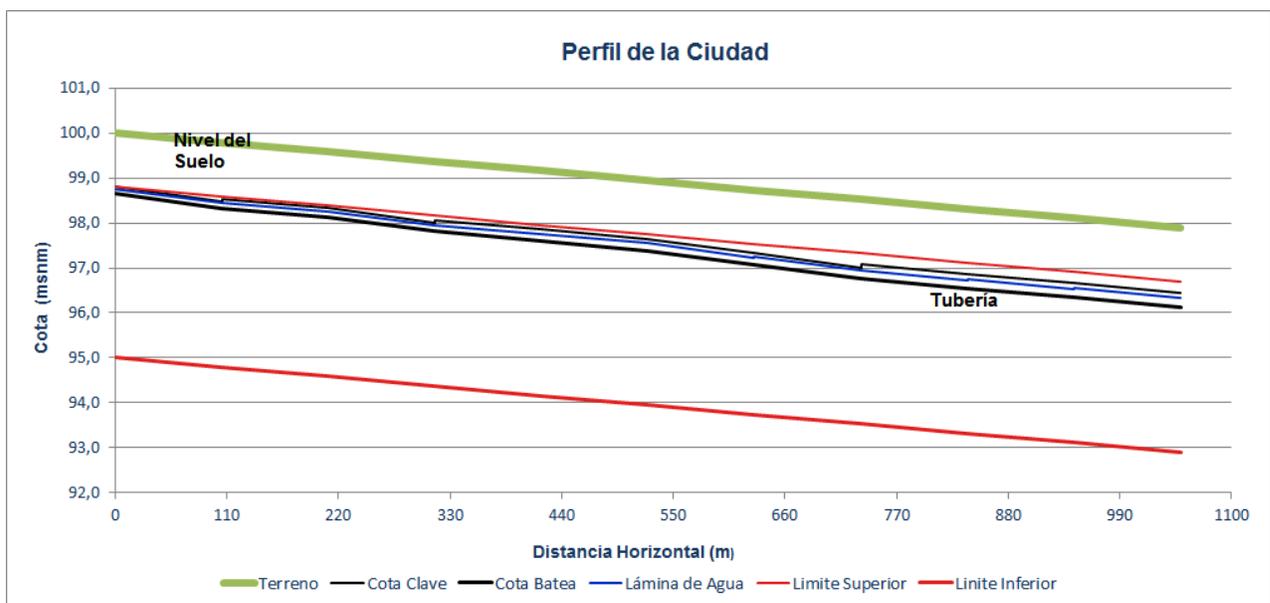


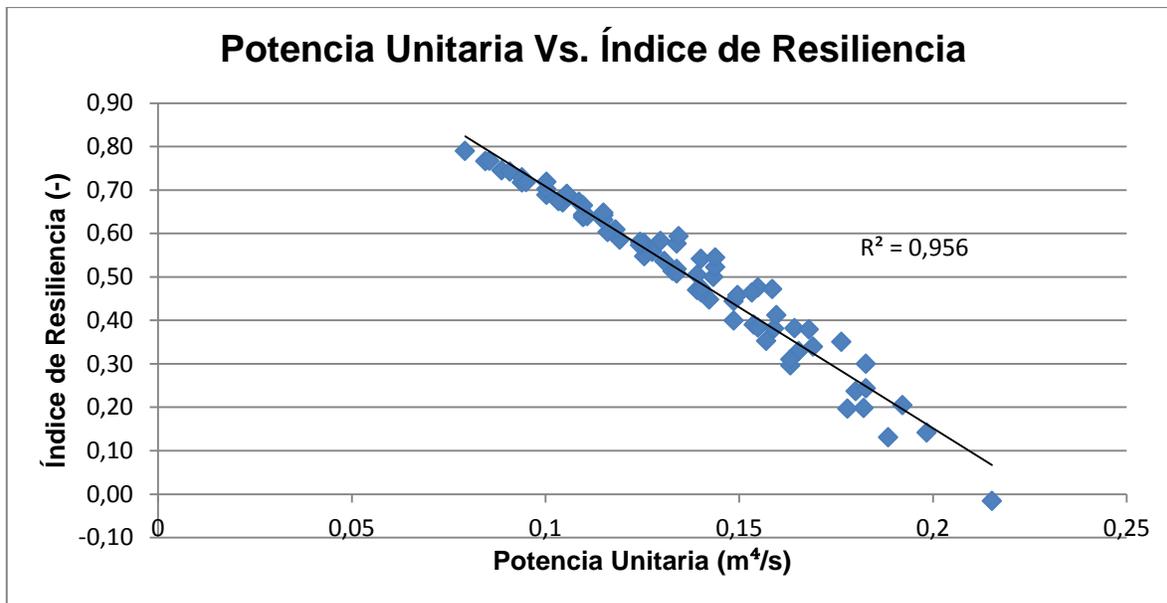
Figura 4.7. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 7

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,151	0,102	0,0030	105	0,003	\$ 15.460.346,70	144,99
2	0,203	0,123	0,0020	105	0,003	\$ 17.160.194,25	144,64
3	0,203	0,129	0,0030	105	0,006	\$ 17.532.382,82	153,48
4	0,253	0,146	0,0020	105	0,005	\$ 19.514.675,69	153,21
5	0,253	0,165	0,0020	105	0,006	\$ 19.514.679,55	153,21
6	0,253	0,157	0,0030	105	0,011	\$ 19.899.750,66	162,33
7	0,253	0,173	0,0030	105	0,013	\$ 20.870.332,50	173,35
8	0,320	0,181	0,0020	105	0,009	\$ 23.825.807,30	172,39
9	0,320	0,193	0,0020	105	0,011	\$ 23.825.811,18	172,39
10	0,320	0,206	0,0020	105	0,012	\$ 23.825.815,06	172,39

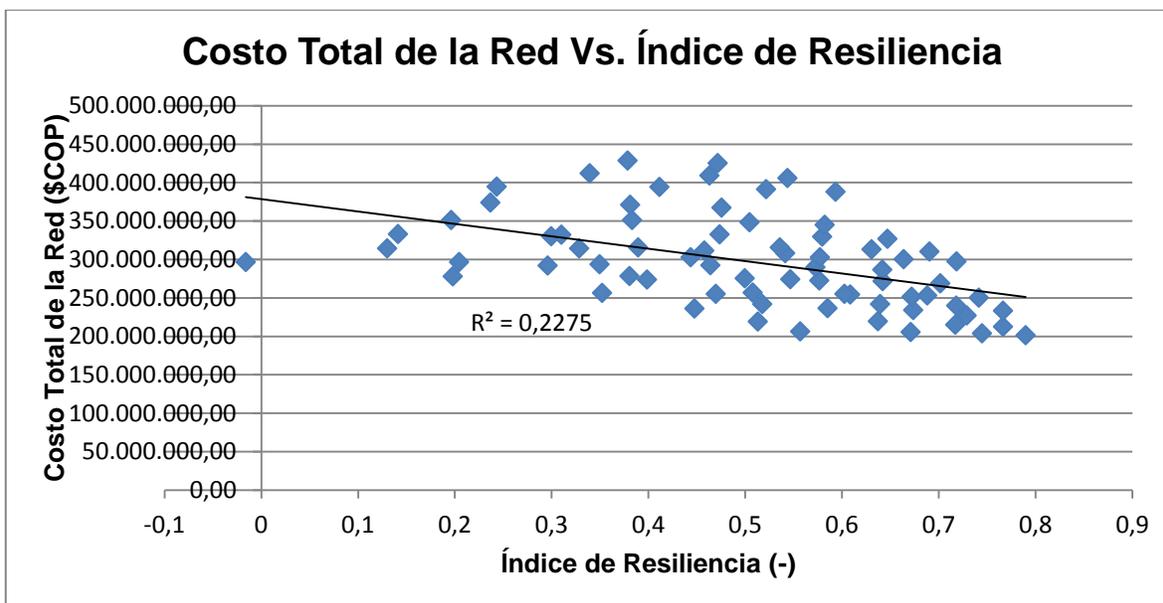
Tabla 4.21. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 7

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00562
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,079
Índice de Resiliencia (-)	0,7898
Volumen Total Excavado (m ³)	1602,381
Costo Total (\$COP)	\$ 201.429.795,71

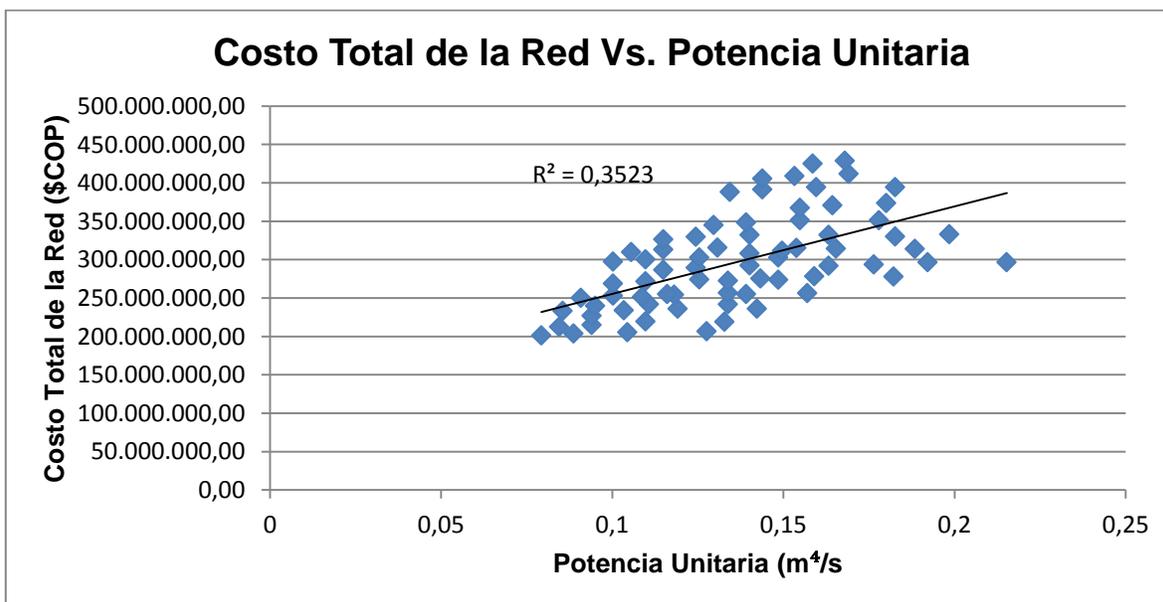
Tabla 4.22. Resultados Totales para la Ciudad 7



Gráfica 4.19. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 7



Gráfica 4.20. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 7



Gráfica 4.21. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 7

4.1.8 Ciudad 8: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	50	90	4
2	55	85	4
3	60	105	4
4	65	90	5
5	70	100	5
6	75	95	5
7	80	95	5
8	85	78	6
9	90	75	6
10	95	105	6
Alternativas Posibles			8.640.000
Alternativas Viables			183

Tabla 4.23. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 8

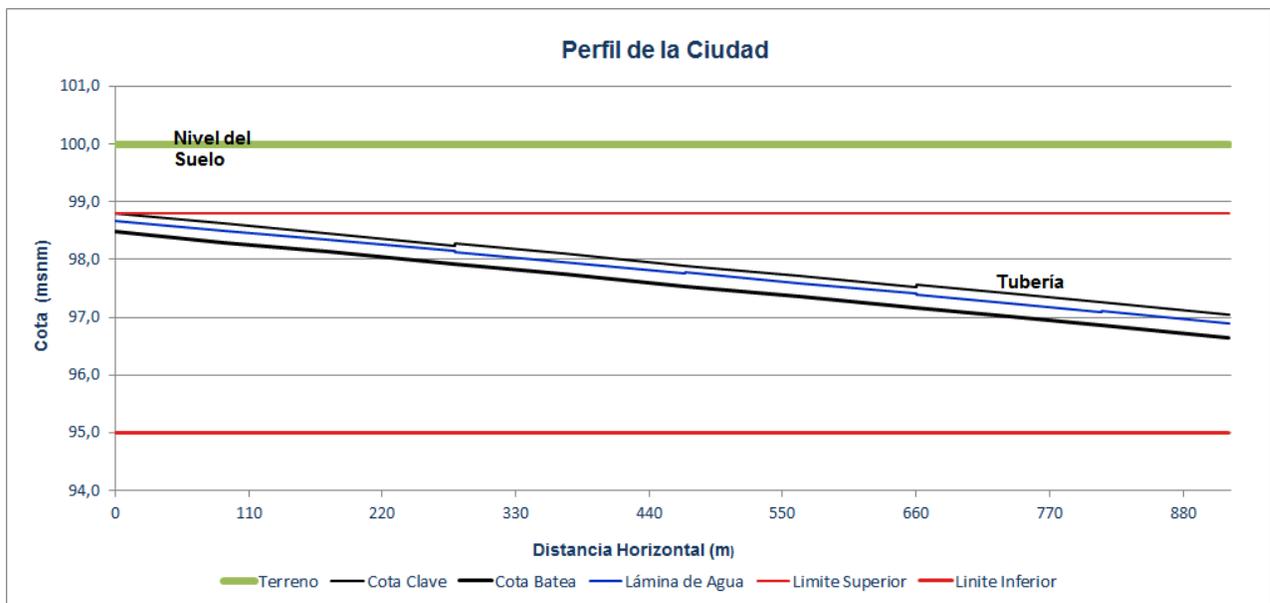
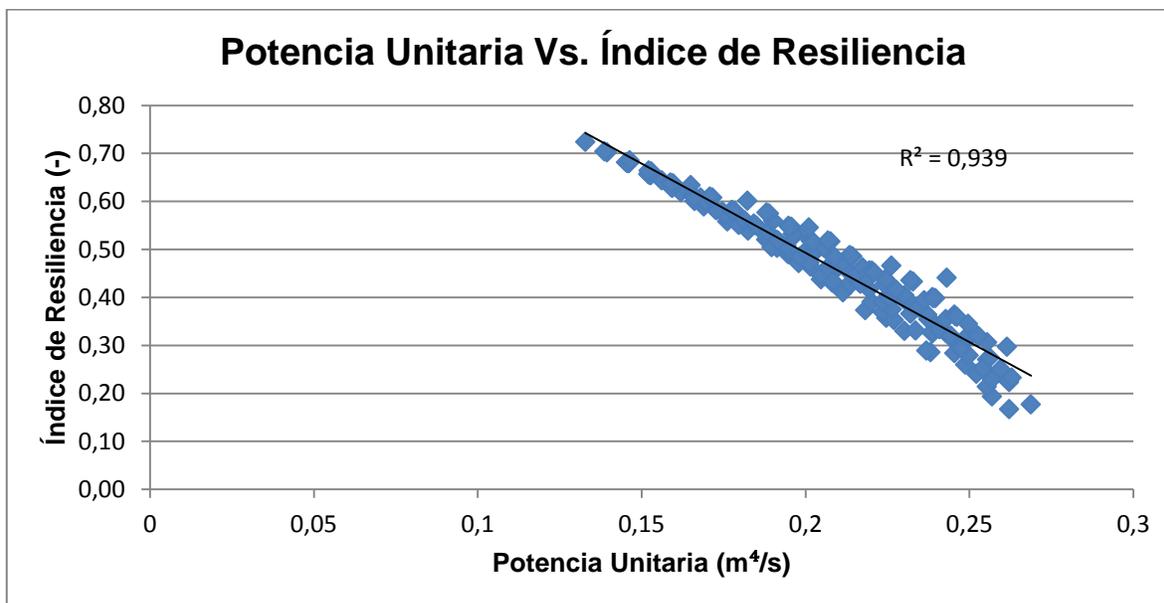


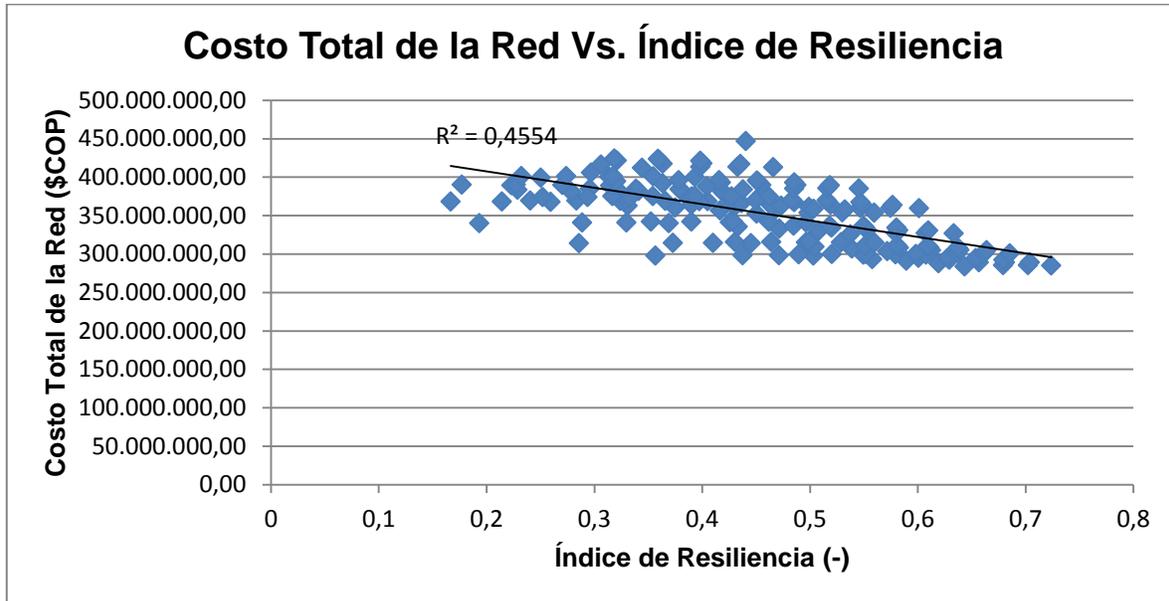
Figura 4.8. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 8

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,320	0,193	0,0020	90	0,009	\$ 18.910.301,76	132,30
2	0,320	0,206	0,0020	85	0,009	\$ 19.243.670,45	139,52
3	0,320	0,220	0,0020	105	0,013	\$ 25.262.055,80	193,81
4	0,360	0,210	0,0020	90	0,012	\$ 24.866.314,59	181,37
5	0,360	0,221	0,0020	100	0,014	\$ 30.518.661,45	221,28
6	0,360	0,232	0,0020	95	0,014	\$ 30.866.760,90	228,38
7	0,360	0,242	0,0020	95	0,015	\$ 32.638.574,84	246,43
8	0,360	0,217	0,0030	78	0,020	\$ 28.758.183,38	220,17
9	0,360	0,225	0,0030	75	0,020	\$ 29.490.140,98	228,66
10	0,360	0,234	0,0030	105	0,030	\$ 43.294.412,39	352,07

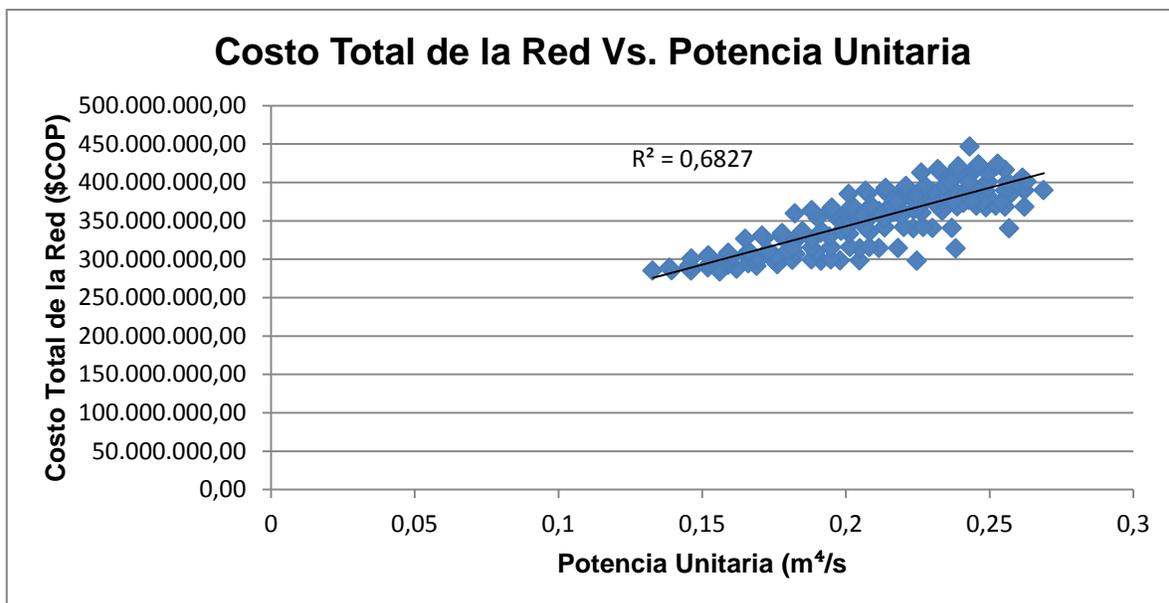
Tabla 4.24. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 8

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00414
Potencia Unitaria (m⁴/s)	0,156
Índice de Resiliencia (-)	0,6436
Volumen Total Excavado (m3)	2143,985
Costo Total (\$COP)	\$ 283.849.076,53

Tabla 4.25. Resultados Totales para la Ciudad 8

Gráfica 4.22. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 8



Gráfica 4.23. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 8



Gráfica 4.24. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 8

4.1.9 Ciudad 9: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 0.3%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	50	90	4
2	55	85	4
3	60	105	4
4	65	90	5
5	70	100	5
6	75	95	5
7	80	95	5
8	85	78	6
9	90	75	6
10	95	105	6
Alternativas Posibles			8.640.000
Alternativas Viables			375

Tabla 4.26. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 9

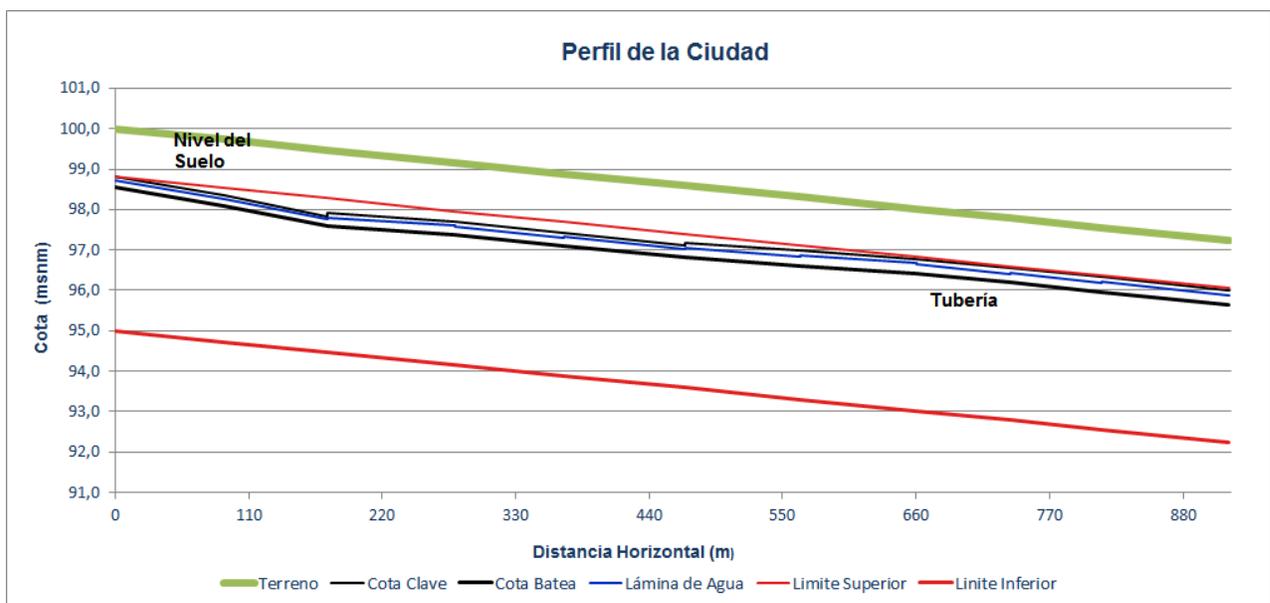
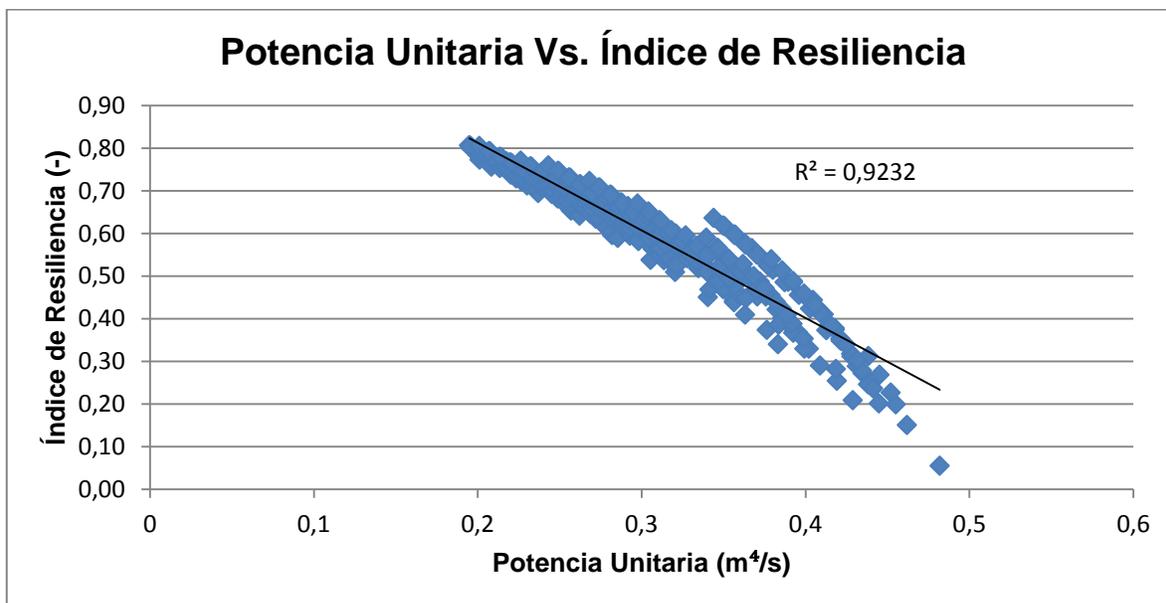


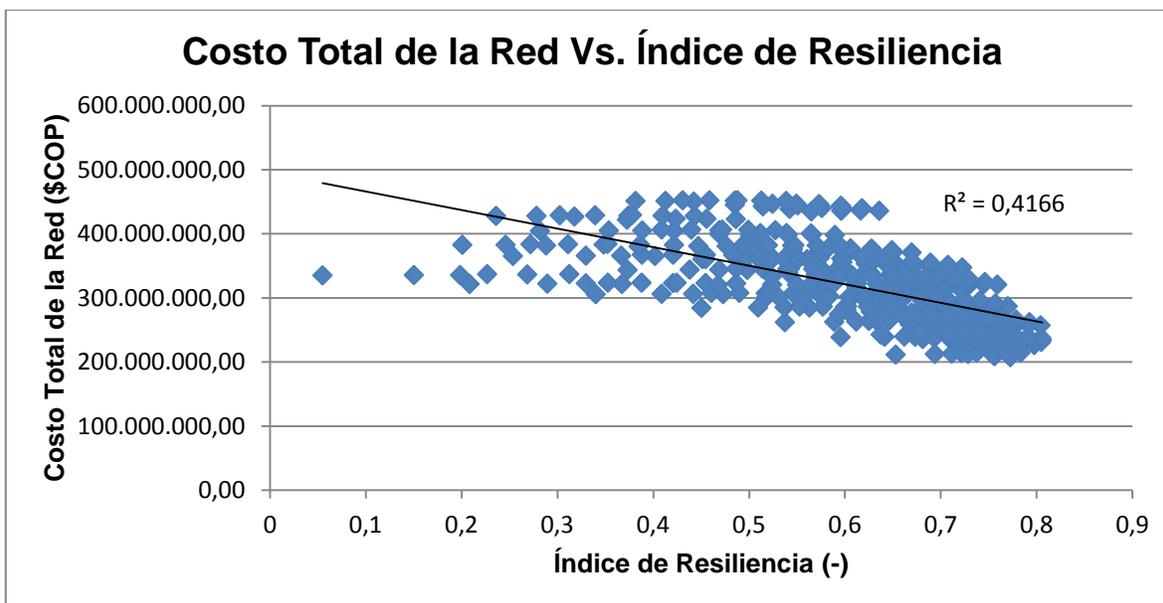
Figura 4.9. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 9

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,166	0,0050	90	0,023	\$ 16.650.745,58	136,76
2	0,253	0,165	0,0060	85	0,028	\$ 17.360.835,09	149,31
3	0,320	0,220	0,0020	105	0,013	\$ 24.655.484,12	179,16
4	0,320	0,198	0,0030	90	0,018	\$ 20.738.809,93	150,79
5	0,320	0,209	0,0030	100	0,021	\$ 22.969.935,71	168,62
6	0,360	0,232	0,0020	95	0,014	\$ 23.056.567,63	150,53
7	0,360	0,242	0,0020	95	0,015	\$ 22.265.646,91	141,50
8	0,360	0,217	0,0030	78	0,020	\$ 18.018.394,18	113,78
9	0,360	0,225	0,0030	75	0,020	\$ 17.352.176,42	109,15
10	0,360	0,234	0,0030	105	0,030	\$ 24.049.751,67	156,40

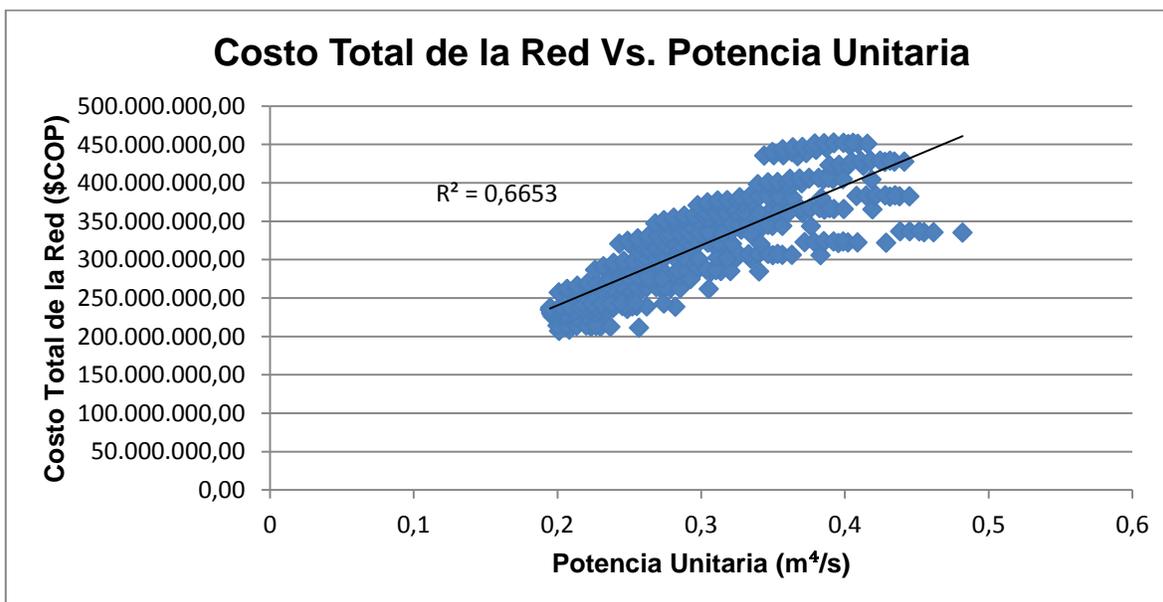
Tabla 4.27. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 9

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00714
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,201
Índice de Resiliencia (-)	0,7727
Volumen Total Excavado (m ³)	1456,007
Costo Total (\$COP)	\$ 207.118.347,25

Tabla 4.28. Resultados Totales para la Ciudad 9

Gráfica 4.25. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 9



Gráfica 4.26. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 9



Gráfica 4.27. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 9

4.1.10 Ciudad 10: Red de 10 Tramos en Topografía Inclineda de 1.0%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	50	90	4
2	55	85	4
3	60	105	4
4	65	90	5
5	70	100	5
6	75	95	5
7	80	95	5
8	85	78	6
9	90	75	6
10	95	105	6
Alternativas Posibles			8.640.000
Alternativas Viables			93

Tabla 4.29. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 10

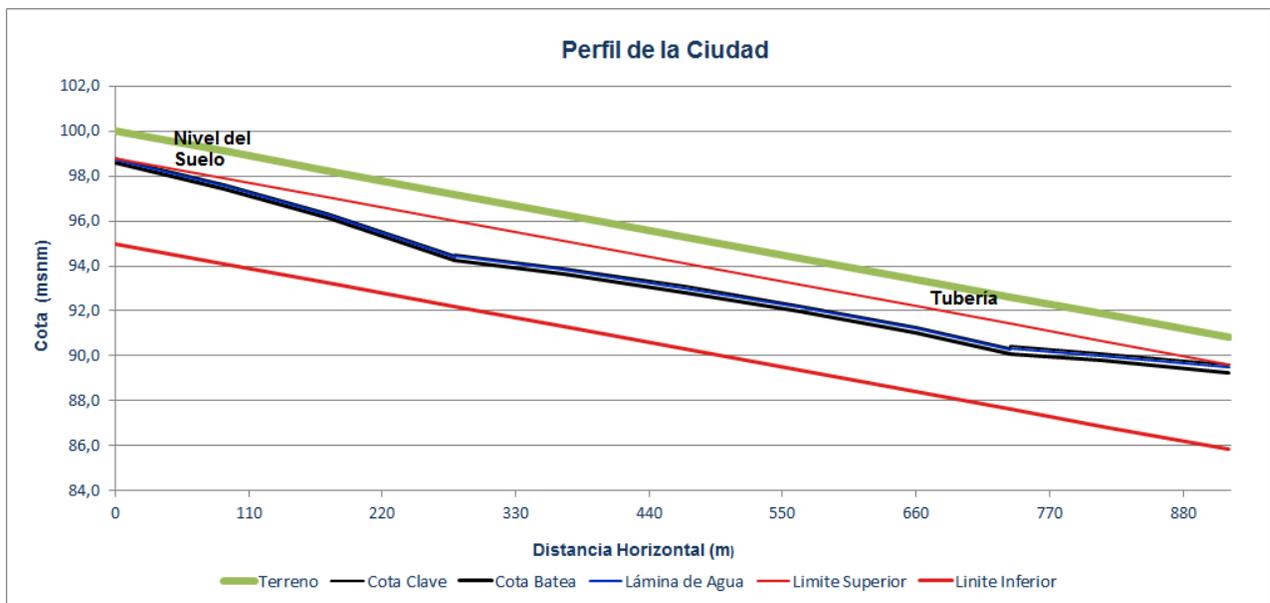
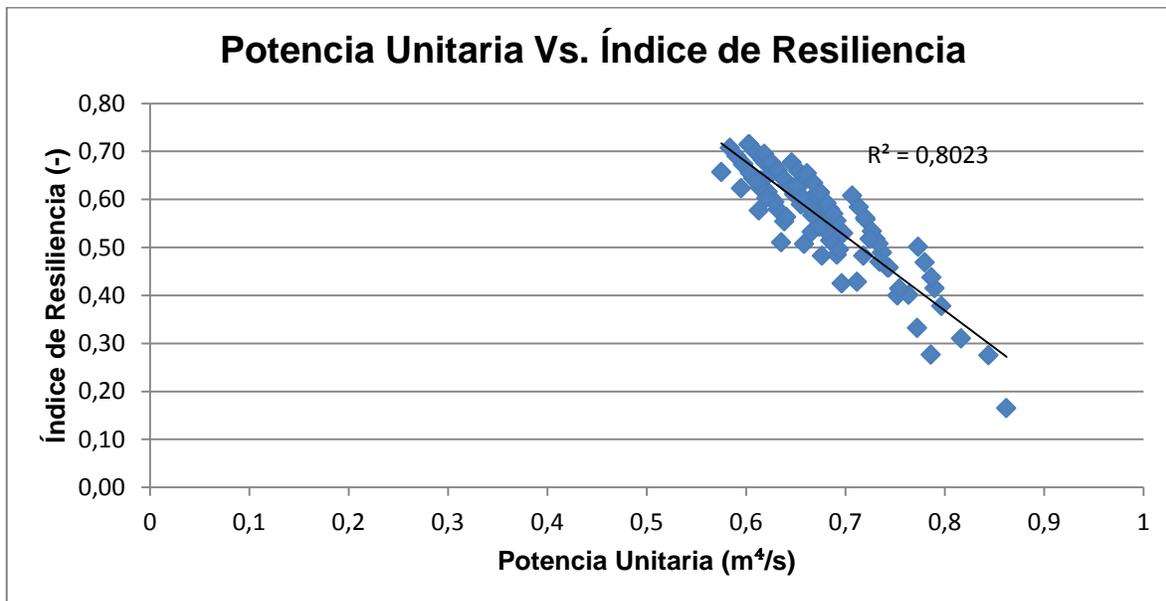


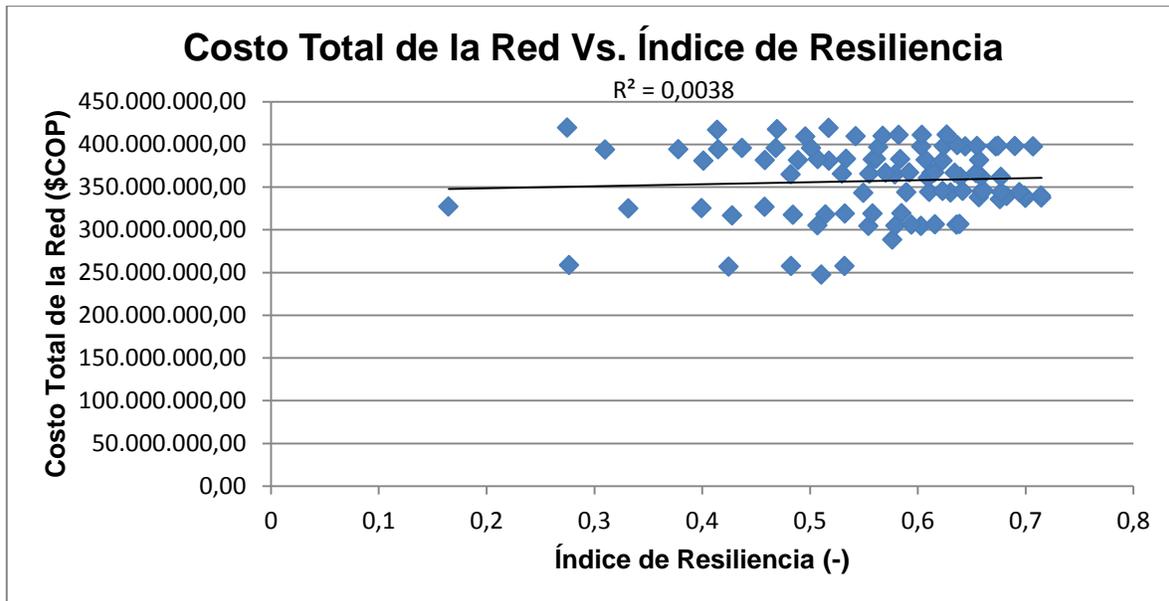
Figura 4.10. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 10

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,139	0,0130	90	0,059	\$ 15.980.356,61	157,41
2	0,203	0,141	0,0150	85	0,070	\$ 17.644.093,35	180,90
3	0,203	0,139	0,0180	105	0,113	\$ 29.291.916,34	309,38
4	0,253	0,175	0,0070	90	0,041	\$ 29.449.313,47	255,50
5	0,253	0,176	0,0080	100	0,056	\$ 30.363.833,26	265,94
6	0,253	0,176	0,0090	95	0,064	\$ 27.436.164,83	240,34
7	0,253	0,177	0,0100	95	0,076	\$ 26.951.798,60	238,78
8	0,253	0,172	0,0120	78	0,080	\$ 22.734.864,14	201,78
9	0,320	0,224	0,0040	75	0,027	\$ 21.695.023,40	165,60
10	0,320	0,213	0,0050	105	0,050	\$ 25.886.577,83	189,15

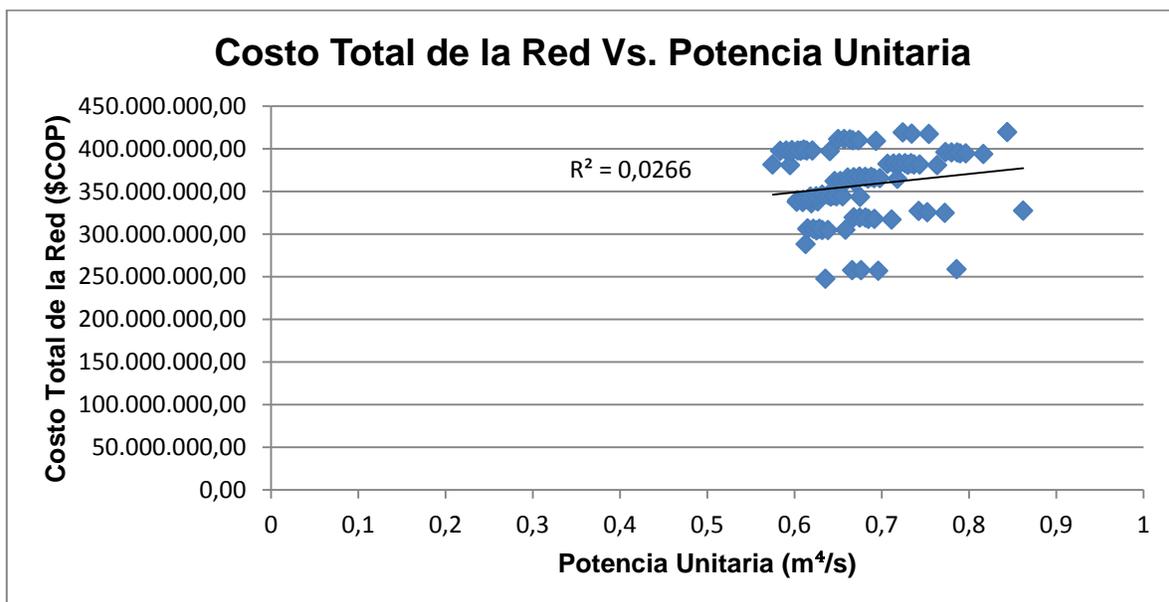
Tabla 4.30. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 10

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,01414
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,636
Índice de Resiliencia (-)	0,5105
Volumen Total Excavado (m ³)	2204,766
Costo Total (\$COP)	\$ 247.433.941,84

Tabla 4.31. Resultados Totales para la Ciudad 10

Gráfica 4.28. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 10



Gráfica 4.29. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 10



Gráfica 4.30. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 10

4.1.11 Ciudad 11: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	40	45	3
2	48	45	4
3	56	45	4
4	64	45	5
5	72	45	5
6	80	45	5
7	88	45	6
8	96	45	6
9	104	45	6
10	112	105	6
Alternativas Posibles			7.776.000
Alternativas Viables			847

Tabla 4.32. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 11

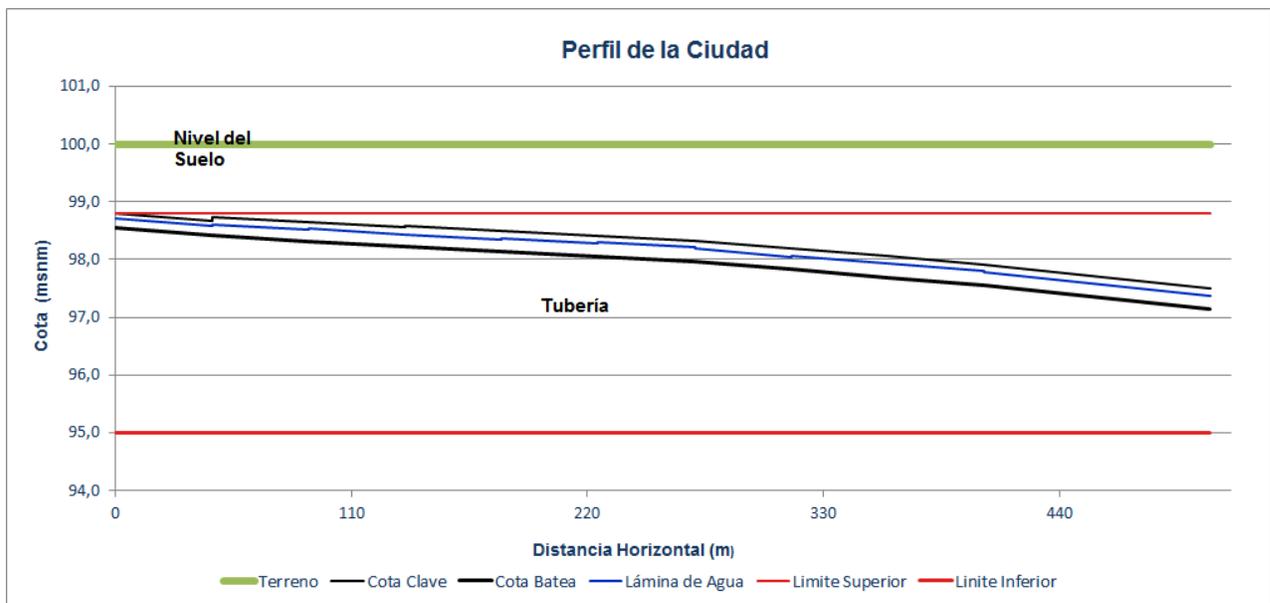
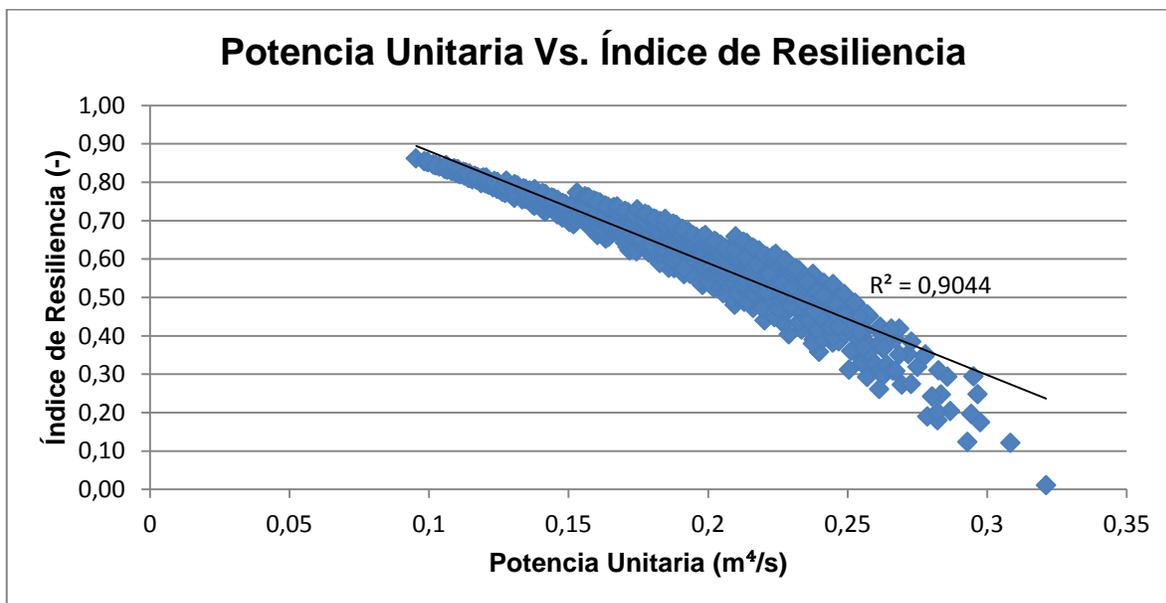


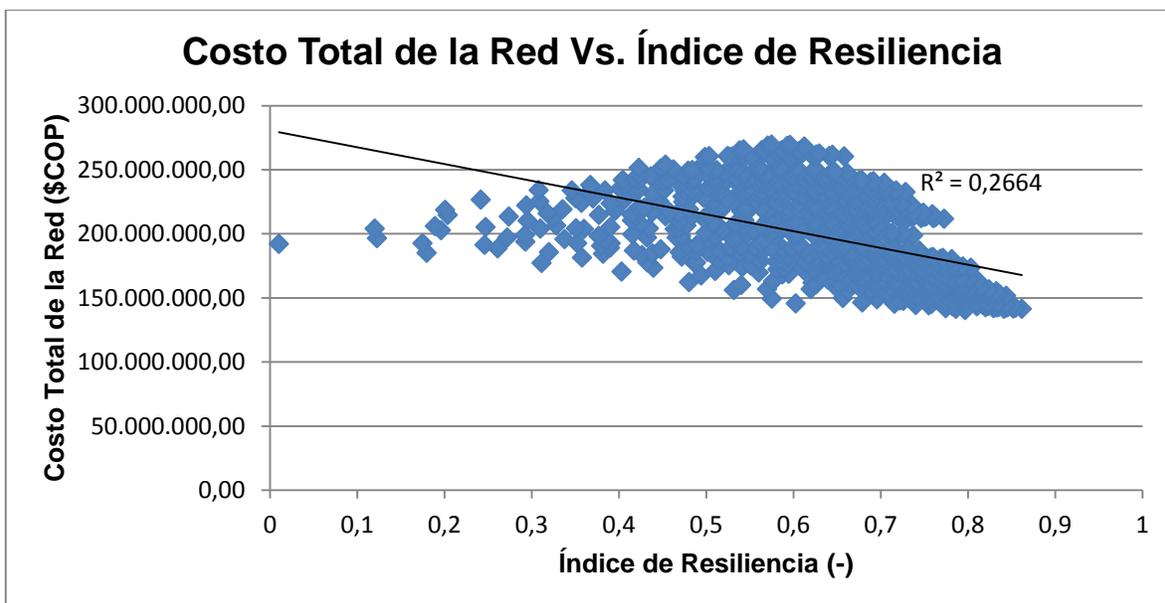
Figura 4.11. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 11

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,173	0,0030	45	0,005	\$ 8.593.797,86	62,74
2	0,320	0,188	0,0020	45	0,004	\$ 10.071.992,84	65,73
3	0,320	0,209	0,0020	45	0,005	\$ 10.446.342,64	69,78
4	0,360	0,208	0,0020	45	0,006	\$ 11.537.782,05	73,08
5	0,360	0,225	0,0020	45	0,006	\$ 11.917.231,25	77,13
6	0,360	0,242	0,0020	45	0,007	\$ 12.299.958,64	81,18
7	0,360	0,222	0,0030	45	0,012	\$ 12.777.625,28	87,01
8	0,360	0,236	0,0030	45	0,013	\$ 13.365.240,40	93,09
9	0,360	0,250	0,0030	45	0,014	\$ 14.552.180,67	99,16
10	0,360	0,235	0,0040	105	0,047	\$ 34.898.041,67	271,89

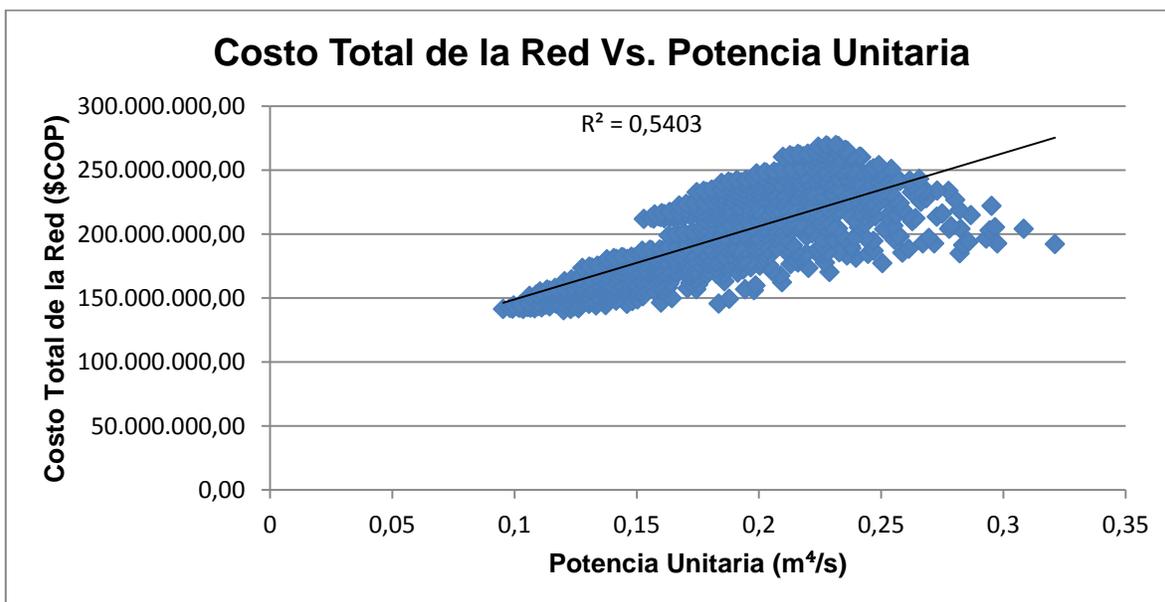
Tabla 4.33. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 11

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00745
Potencia Unitaria (m⁴/s)	0,120
Índice de Resiliencia (-)	0,7970
Volumen Total Excavado (m³)	980,781
Costo Total (\$COP)	\$ 140.460.193,32

Tabla 4.34. Resultados Totales para la Ciudad 11

Gráfica 4.31. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 11



Gráfica 4.32. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 11



Gráfica 4.33. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 11

4.1.12 Ciudad 12: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.2%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	40	45	3
2	48	45	4
3	56	45	4
4	64	45	5
5	72	45	5
6	80	45	5
7	88	45	6
8	96	45	6
9	104	45	6
10	112	105	6
Alternativas Posibles			7.776.000
Alternativas Viables			1097

Tabla 4.35. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 12

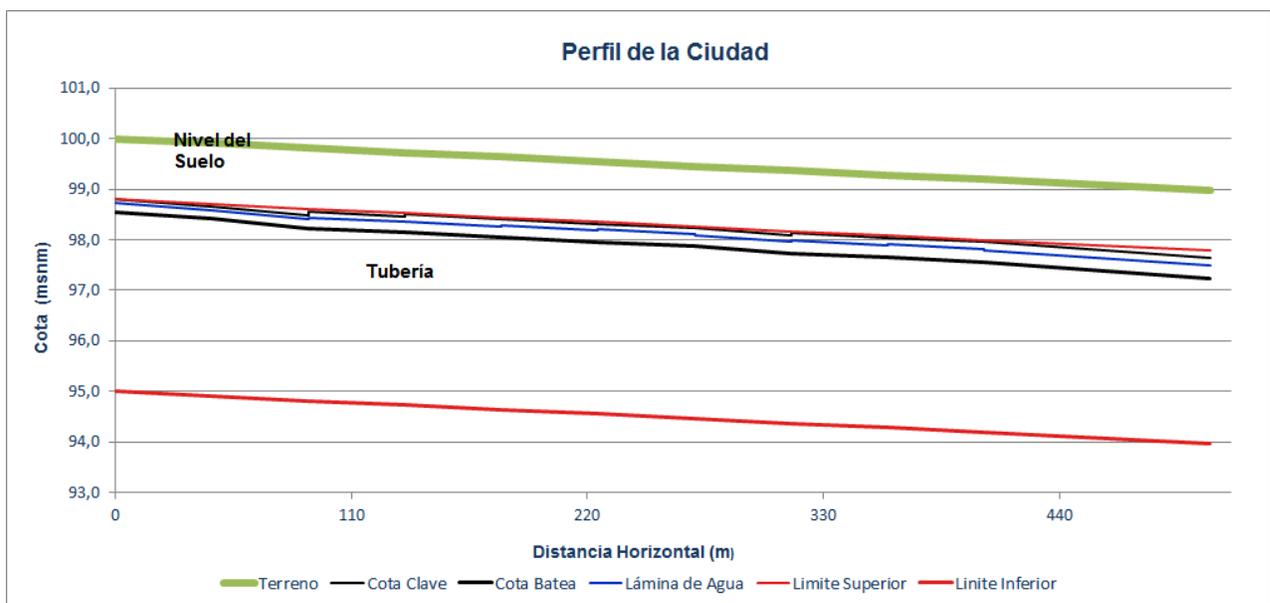


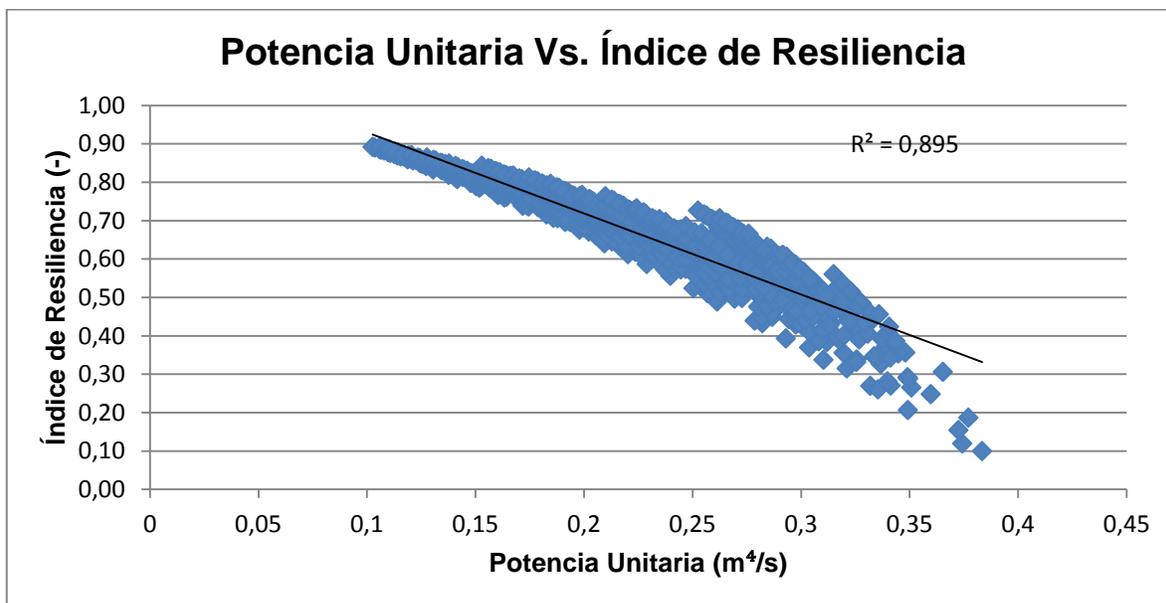
Figura 4.12. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 12

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,173	0,0030	45	0,005	\$ 8.487.585,52	60,71
2	0,253	0,176	0,0040	45	0,009	\$ 8.751.104,64	64,41
3	0,320	0,209	0,0020	45	0,005	\$ 9.964.948,65	63,70
4	0,360	0,208	0,0020	45	0,006	\$ 10.683.131,71	62,96
5	0,360	0,225	0,0020	45	0,006	\$ 10.683.132,44	62,96
6	0,360	0,242	0,0020	45	0,007	\$ 10.683.133,18	62,96
7	0,360	0,222	0,0030	45	0,012	\$ 10.764.960,37	64,74
8	0,360	0,236	0,0030	45	0,013	\$ 10.950.179,64	66,76
9	0,360	0,250	0,0030	45	0,014	\$ 11.136.218,48	68,79
10	0,360	0,235	0,0040	105	0,047	\$ 25.906.616,73	185,26

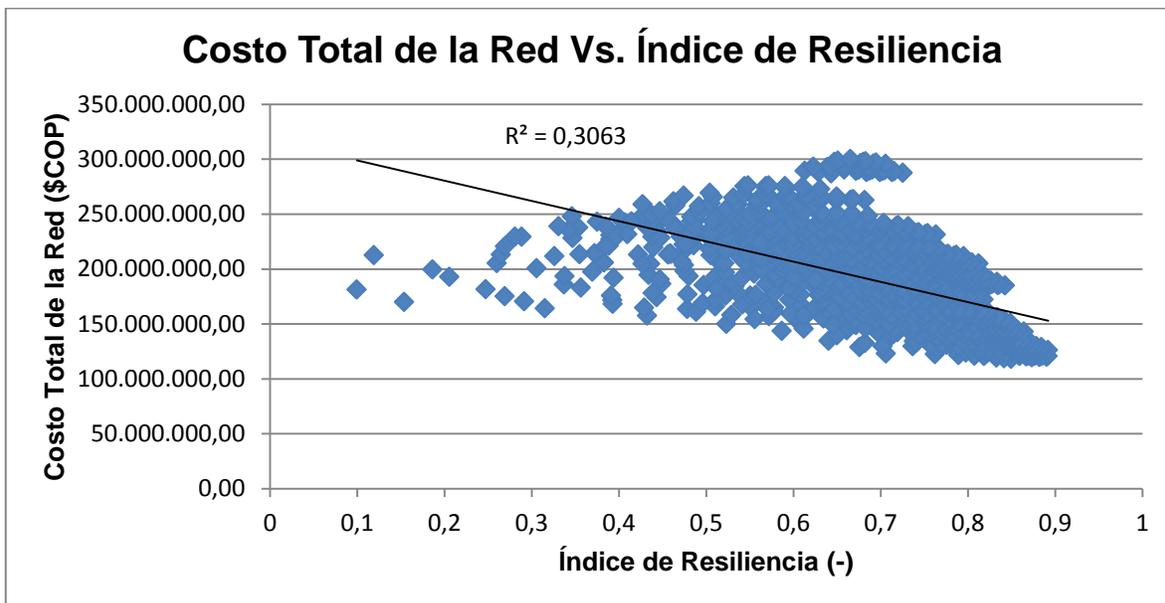
Tabla 4.36. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 12

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00945
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,124
Índice de Resiliencia (-)	0,8494
Volumen Total Excavado (m ³)	763,242
Costo Total (\$COP)	\$ 118.011.011,36

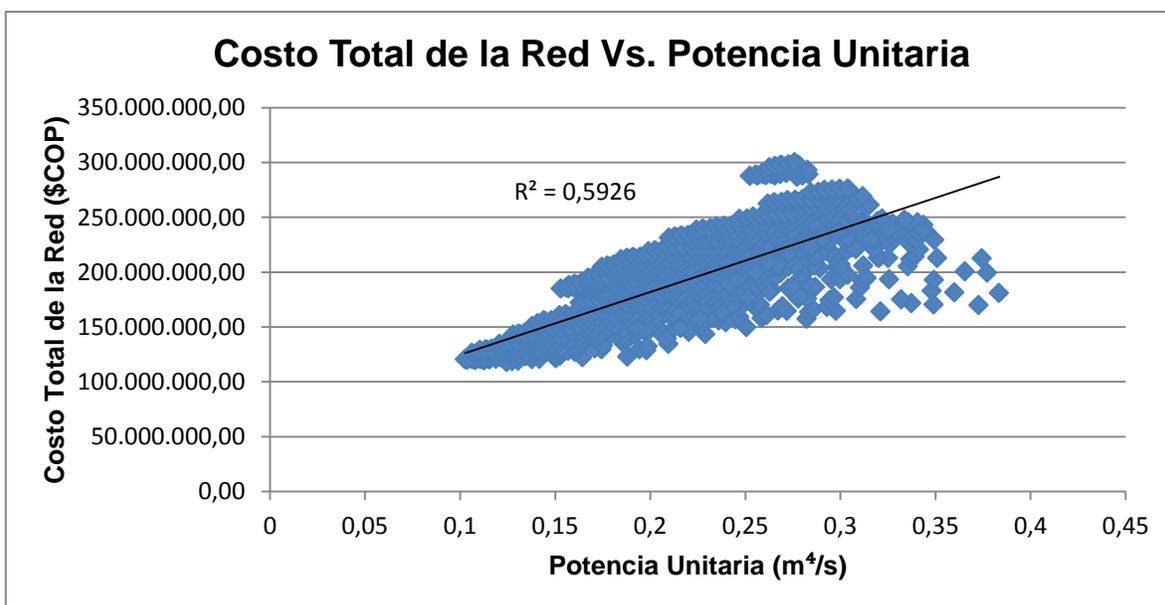
Tabla 4.37. Resultados Totales para la Ciudad 12



Gráfica 4.34. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12



Gráfica 4.35. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12



Gráfica 4.36. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 12

4.1.13 Ciudad 13: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	40	60	3
2	47	60	4
3	54	60	4
4	61	60	4
5	68	60	5
6	75	60	5
7	82	60	5
8	89	60	6
9	96	60	6
10	103	60	6
Alternativas Posibles			5.184.000
Alternativas Viables			511

Tabla 4.38. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 13

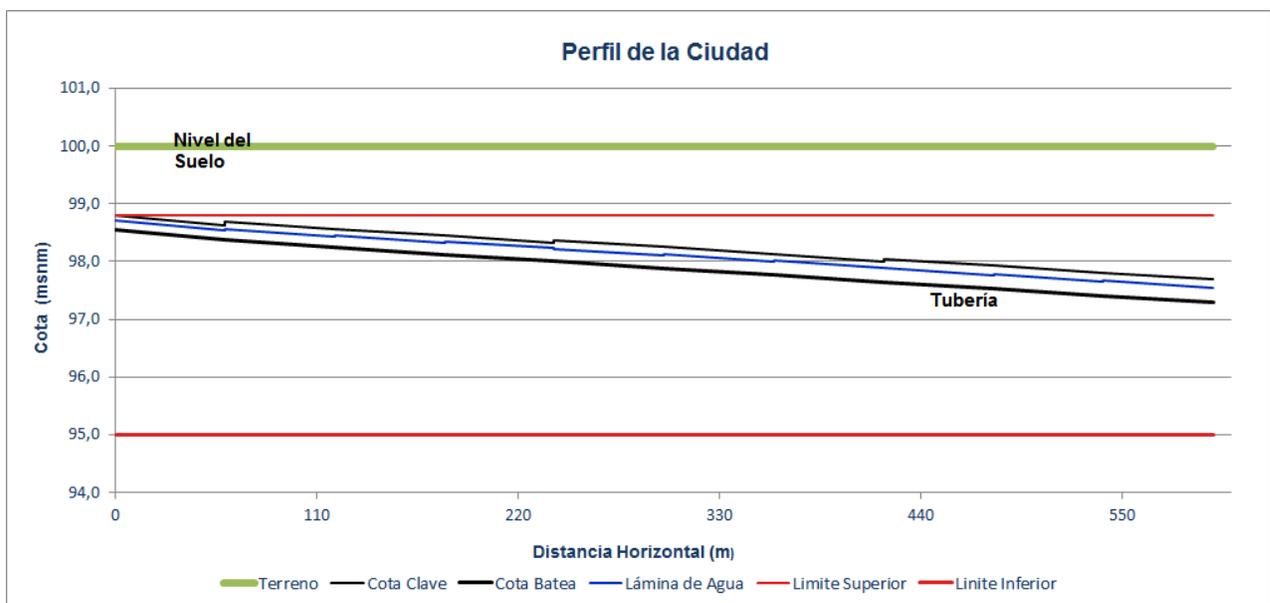
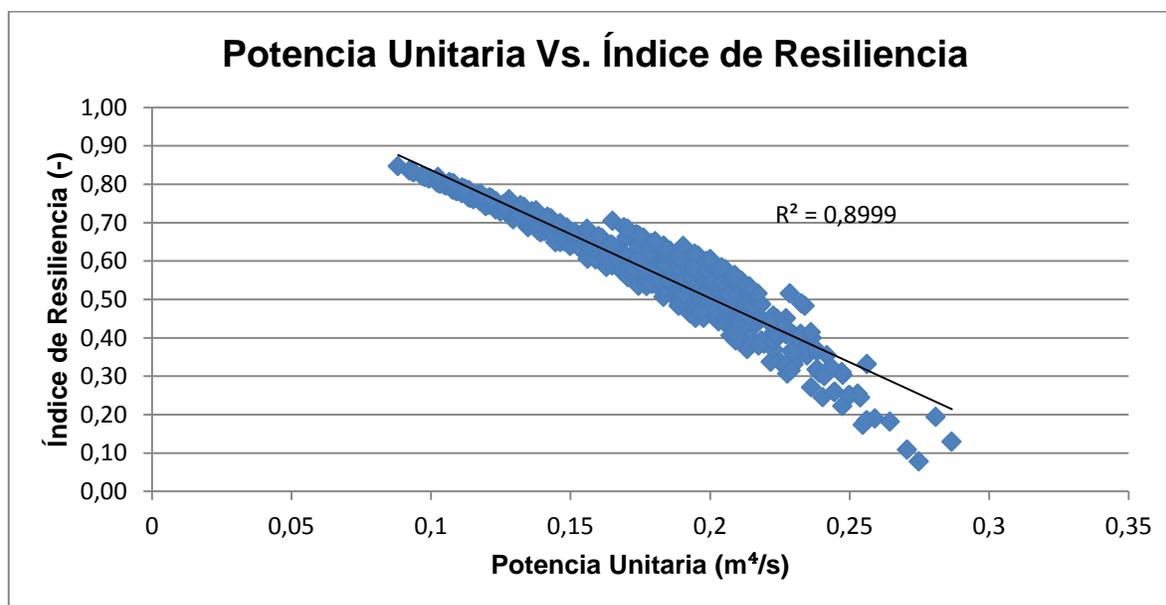


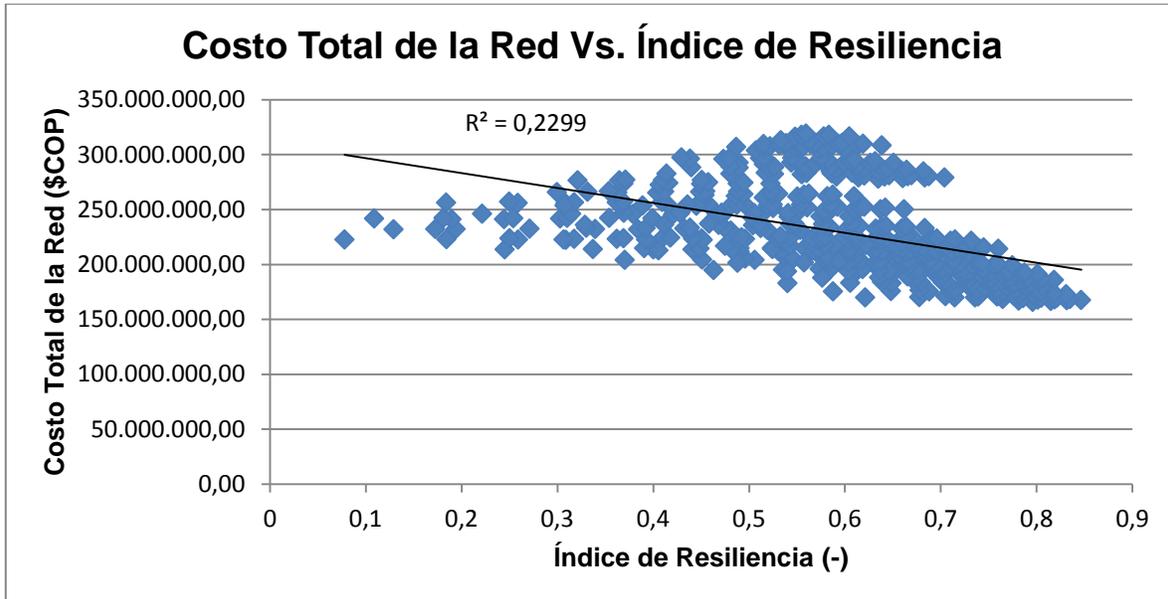
Figura 4.13. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 13

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,173	0,0030	60	0,007	\$ 11.231.369,63	85,88
2	0,320	0,186	0,0020	60	0,006	\$ 13.412.735,38	91,88
3	0,320	0,204	0,0020	60	0,006	\$ 14.068.003,10	99,08
4	0,320	0,222	0,0020	60	0,007	\$ 14.729.098,72	106,28
5	0,360	0,217	0,0020	60	0,008	\$ 16.350.511,42	112,52
6	0,360	0,232	0,0020	60	0,009	\$ 17.021.320,20	119,72
7	0,360	0,247	0,0020	60	0,010	\$ 17.697.956,86	126,92
8	0,360	0,224	0,0030	60	0,016	\$ 19.360.289,14	137,29
9	0,360	0,236	0,0030	60	0,017	\$ 20.462.132,22	148,09
10	0,360	0,248	0,0030	60	0,019	\$ 21.577.088,13	158,89

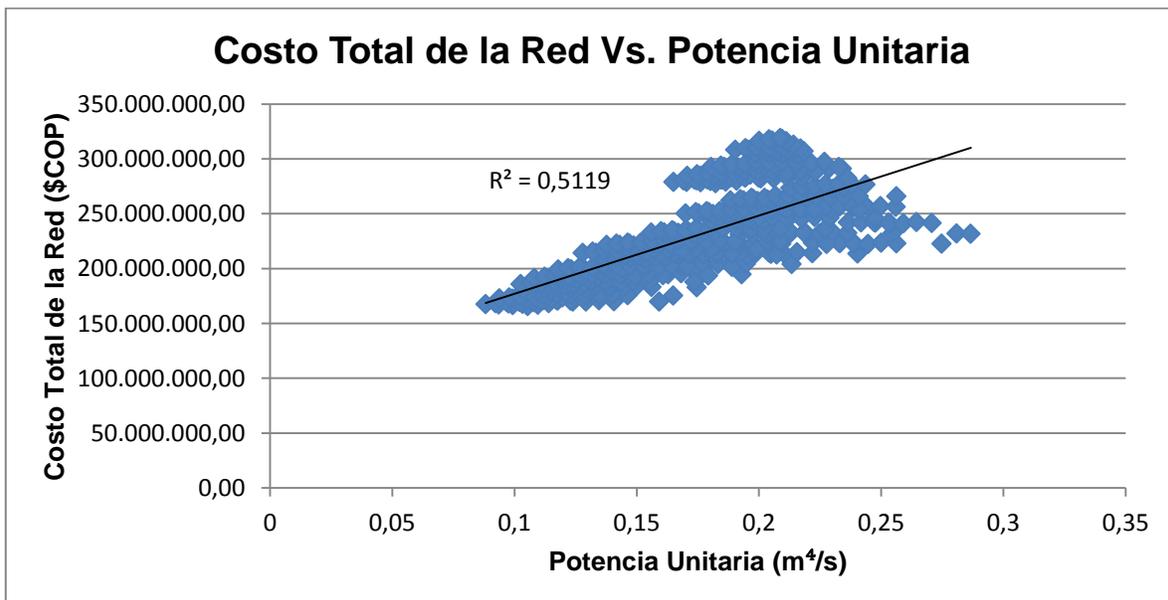
Tabla 4.39. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 13

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00633
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,105
Índice de Resiliencia (-)	0,7961
Volumen Total Excavado (m ³)	1186,584
Costo Total (\$COP)	\$ 165.910.504,80

Tabla 4.40. Resultados Totales para la Ciudad 13

Gráfica 4.37. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 13



Gráfica 4.38. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 13



Gráfica 4.39. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 13

4.1.14 Ciudad 14: Red de 10 Tramos en Topografía Plana

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	40	150	3
2	46	150	4
3	52	150	4
4	58	150	4
5	64	150	5
6	70	150	5
7	76	150	5
8	82	150	5
9	88	150	6
10	94	150	6
Alternativas Posibles			864.000
Alternativas Viables			23

Tabla 4.41. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 14

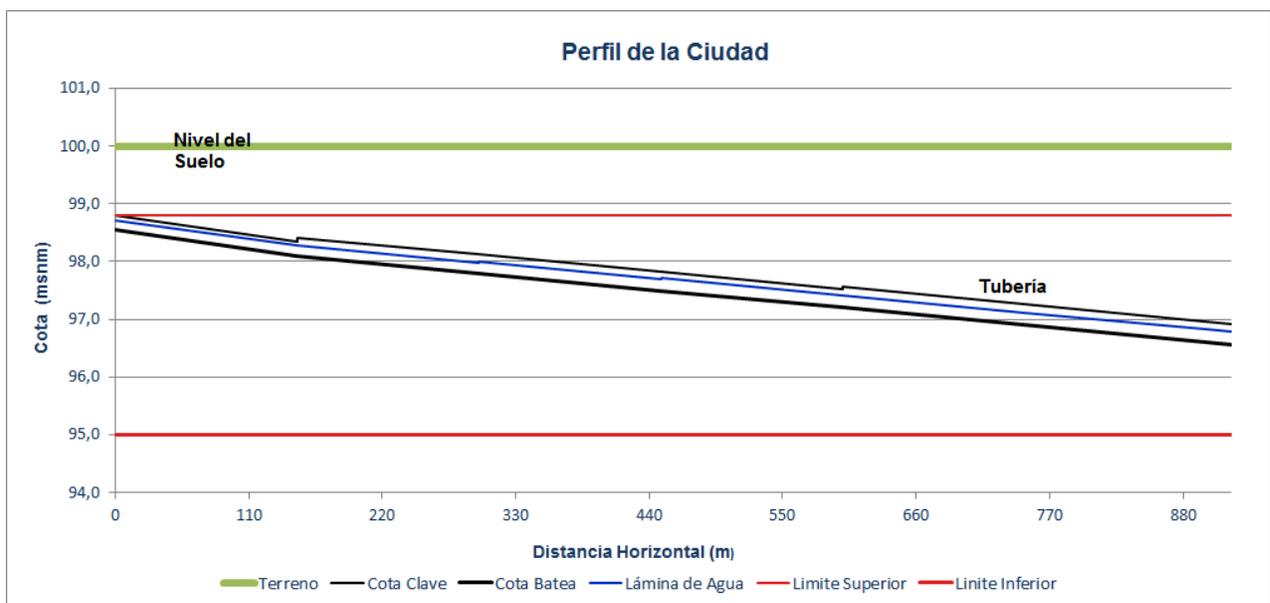
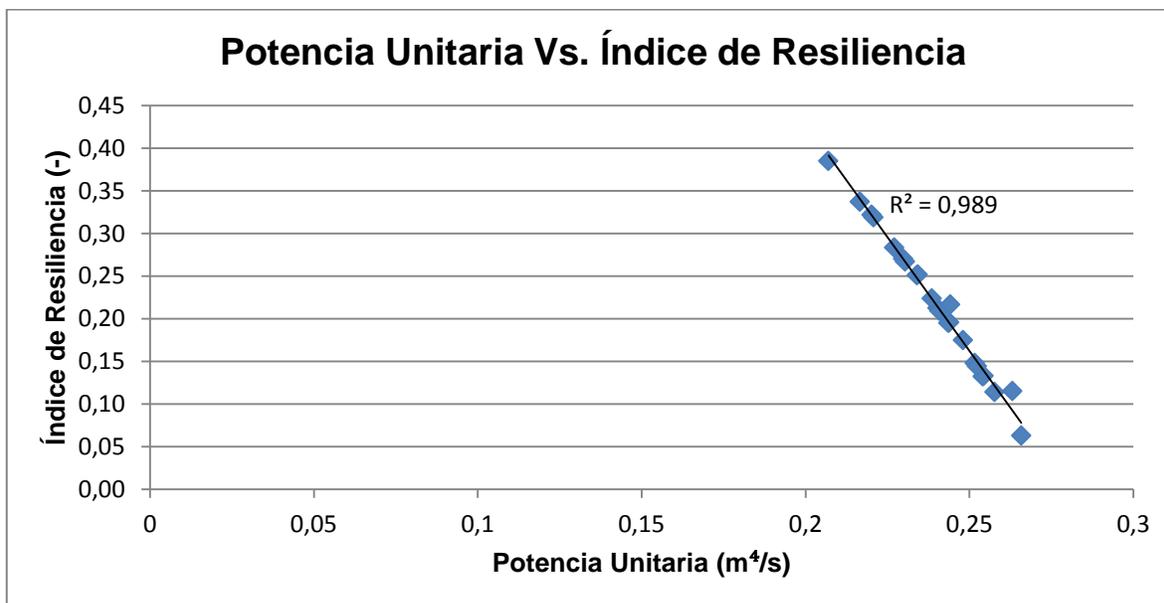


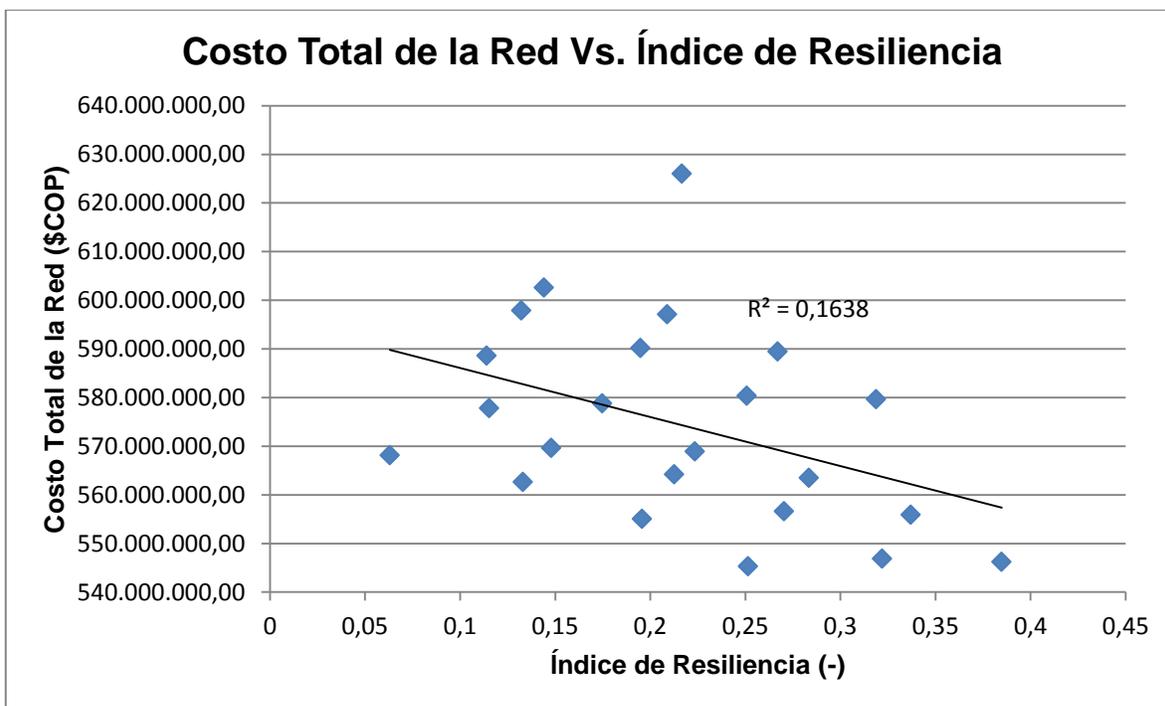
Figura 4.14. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 14

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,173	0,0030	150	0,018	\$ 27.970.152,21	248,18
2	0,320	0,183	0,0020	150	0,014	\$ 36.516.924,35	293,43
3	0,320	0,198	0,0020	150	0,016	\$ 42.513.570,78	338,43
4	0,320	0,214	0,0020	150	0,017	\$ 46.792.039,47	383,43
5	0,360	0,208	0,0020	150	0,019	\$ 53.520.482,08	426,57
6	0,360	0,221	0,0020	150	0,021	\$ 57.866.942,86	471,57
7	0,360	0,234	0,0020	150	0,023	\$ 62.249.827,98	516,57
8	0,360	0,247	0,0020	150	0,025	\$ 66.669.137,43	561,57
9	0,360	0,222	0,0030	150	0,040	\$ 72.210.935,51	626,37
10	0,360	0,232	0,0030	150	0,042	\$ 78.990.167,32	693,87

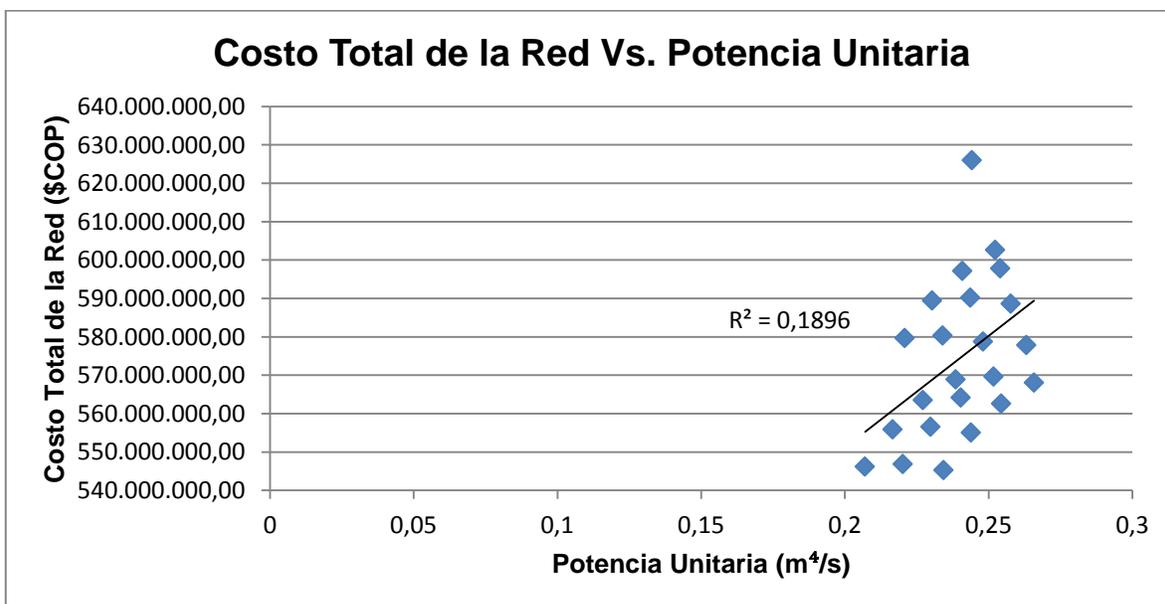
Tabla 4.42. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 14

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00253
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,234
Índice de Resiliencia (-)	0,2515
Volumen Total Excavado (m ³)	4559,996
Costo Total (\$COP)	\$ 545.300.179,99

Tabla 4.43. Resultados Totales para la Ciudad 14

Gráfica 4.40. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 14



Gráfica 4.41. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 14



Gráfica 4.42. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 14

4.1.15 Ciudad 15: Red de 10 Tramos en Topografía Inclinada de 0.2%

No. Tramo	Caudal de Diseño (L/s)	Longitud (m)	No. De Pendientes Propias
1	40	150	3
2	46	150	4
3	52	150	4
4	58	150	4
5	64	150	5
6	70	150	5
7	76	150	5
8	82	150	5
9	88	150	6
10	94	150	6
Alternativas Posibles			864.000
Alternativas Viables			222

Tabla 4.44. Características de la Red de Alcantarillado de la Ciudad 15

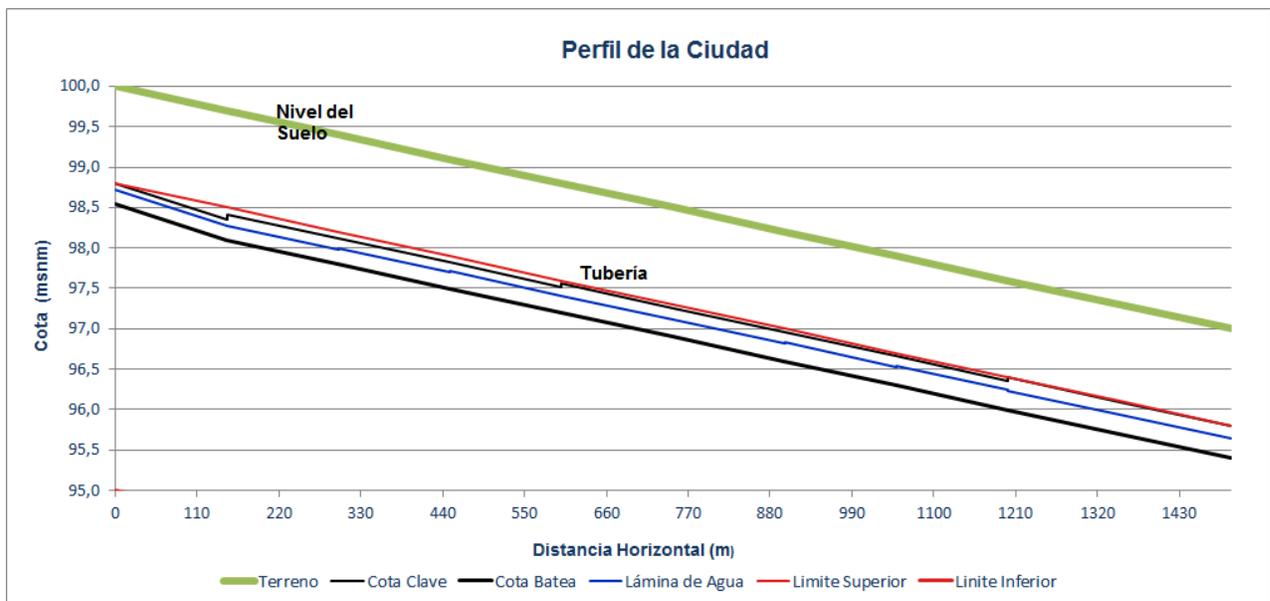
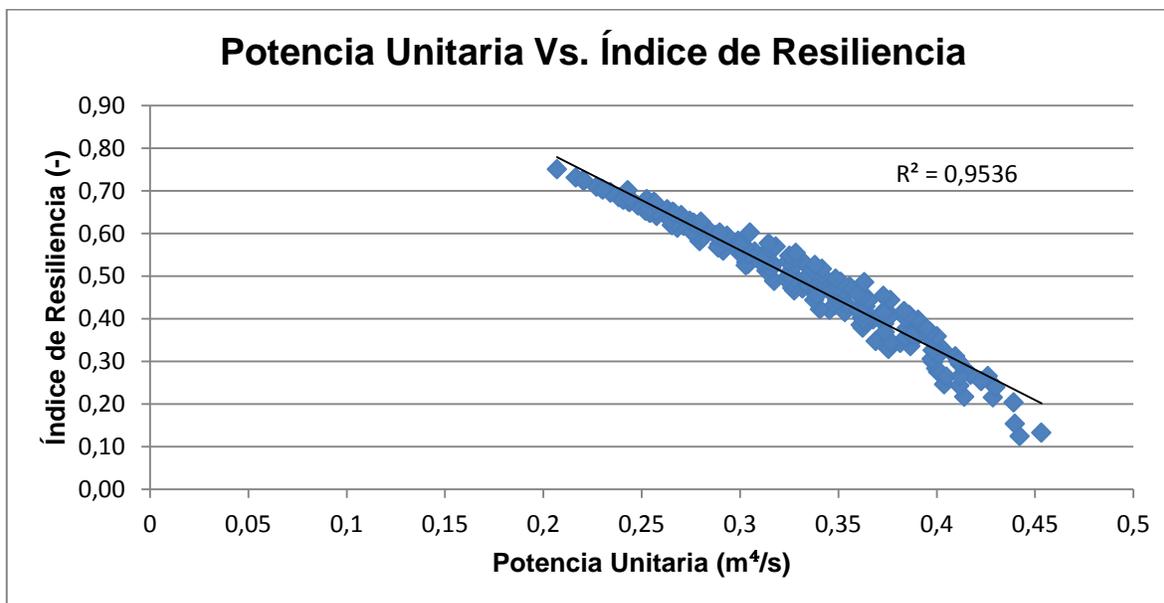


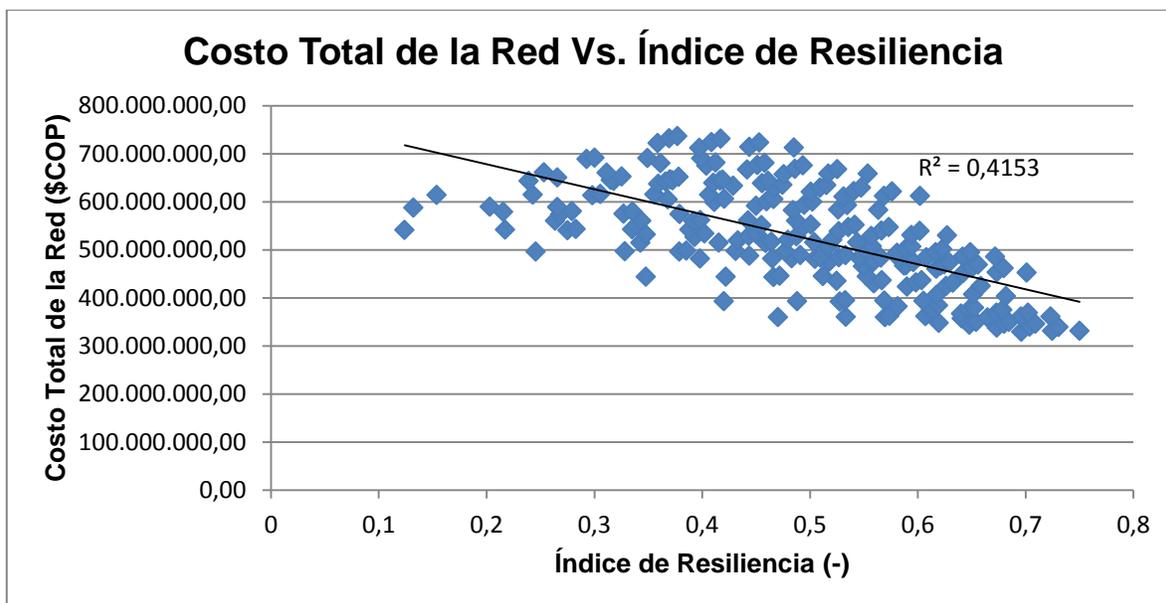
Figura 4.15. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 15

No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,253	0,173	0,0030	150	0,018	\$ 26.988.248,60	225,68
2	0,320	0,183	0,0020	150	0,014	\$ 31.599.398,31	225,93
3	0,320	0,198	0,0020	150	0,016	\$ 31.599.406,08	225,93
4	0,320	0,214	0,0020	150	0,017	\$ 31.599.413,86	225,93
5	0,360	0,208	0,0020	150	0,019	\$ 34.045.458,80	224,07
6	0,360	0,221	0,0020	150	0,021	\$ 34.045.466,57	224,07
7	0,360	0,234	0,0020	150	0,023	\$ 34.045.474,34	224,07
8	0,360	0,247	0,0020	150	0,025	\$ 34.045.482,10	224,07
9	0,360	0,222	0,0030	150	0,040	\$ 34.852.427,14	243,87
10	0,360	0,232	0,0030	150	0,042	\$ 36.808.245,14	266,37

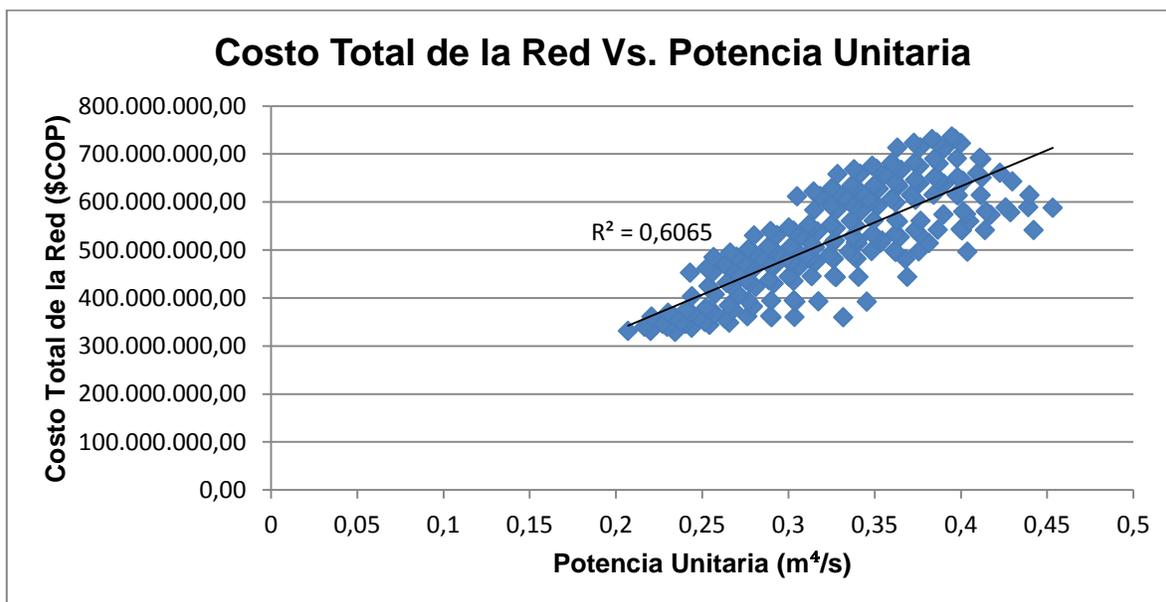
Tabla 4.45. Resultados de Diseño Para Cada Tramo de la Ciudad 15

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00453
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,234
Índice de Resiliencia (-)	0,6960
Volumen Total Excavado (m ³)	2309,966
Costo Total (\$COP)	\$ 329.629.020,93

Tabla 4.46. Resultados Totales para la Ciudad 15

Gráfica 4.43. Relación entre la Potencia Unitaria de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 15



Gráfica 4.44. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 15



Gráfica 4.45. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 15

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados mostrados para las 15 ciudades diseñadas anteriormente, identificando así relaciones potenciales que puedan en futuros trabajos guiar el diseño optimizado de alcantarillados. Además de esto, se hará un análisis de sensibilidad utilizando una de las ciudades estudiadas para analizar cómo responde el diseño final de la red a variaciones en los costos de excavación y de la tubería, reconociendo así cuál de estos dos componentes influye más en el diseño.

5.1 Análisis de las Ciudades Hipotéticas

El análisis de las ciudades hipotéticas construidas en el Capítulo 4 debe realizarse desde diferentes aspectos, dentro de los cuales los más importantes se refieren a la topografía de cada una de estas ciudades, los costos obtenidos en su diseño, la relación entre potencia unitaria e índice de resiliencia, y finalmente la interacción entre cada uno de estos criterios de confiabilidad con los costos totales de la red.

5.1.1 Topografía de las Ciudades

En primer lugar, respecto a la topografía del terreno de cada una de las ciudades, esta se consideró plana o inclinada con pendientes entre el 0.1% y 1%. La razón de esta elección consistió en que para inclinaciones mayores al 1.0% del terreno el programa utilizado solo pocas veces encontró alternativas válidas para realizar el diseño. Lo anterior se puede explicar ya que cuando la pendiente del terreno es mayor a la del fondo de la tubería, la red se saldría a la superficie del terreno, invalidando así las restricciones impuestas para la selección de las alternativas viables de la red (CIACUA, 2012).

Al observar la pendiente con la cual se diseñaron las diferentes ciudades, se puede observar que en aquellas donde la topografía era plana, o la pendiente era muy pequeña (0.1%, 0.2% y 0.3%) las tuberías de cada tramo tenían una pendiente en su base muy similar a medida que se avanzaba hacia aguas abajo. Esta uniformidad se perdió totalmente cuando se probaron las ciudades cuyo terreno tiene una inclinación de 1.0% ya que como se puede observar en los perfiles de las ciudades 3 y 10 la pendiente de las tuberías tramo a tramo tiene una alta variación, la cual se muestra en que unos conductos se entierran mucho, mientras que otros lo hacen muy poco en tramos consecutivos. Este comportamiento puede atribuirse de igual forma a la misma razón por la cual en pendientes mayores al 1% muchas veces no se encontraron alternativas válidas, y es que para evitar que la tubería se salga del terreno, se selecciona del conjunto de pendientes

lógicas aquellas que satisfagan esta restricción, siendo estas las más grandes, generando así la falta de uniformidad en la red de la que se habló previamente.

5.1.2 Costos Totales

Para analizar los costos totales de las diferentes ciudades, y la relevancia relativa de los costos de la tubería respecto los de la excavación se debe revisar el análisis de sensibilidad realizado en el Numeral 5.2.

5.1.3 Relación entre el Índice de Resiliencia y la Potencia Unitaria

El Índice de Resiliencia propuesto tuvo un buen desempeño al compararlo con la Potencia Unitaria de la red, lo cual se demuestra al observar que en todas las ciudades se obtuvo una tendencia clara de la relación inversamente proporcional entre estos dos conceptos. La relación encontrada se resume en que a mayor confiabilidad para funcionar bajo fallas (superávit de potencia) se tenga, la red disipará menos energía a medida que el flujo pasa por esta.

La tendencia lineal se puede evidenciar en los coeficientes de determinación obtenidos en las 15 ciudades, los cuales en promedio fueron de 0.9343, presentándose los mínimos para las ciudades con topografía inclinada de 1%. El valor de los R^2 por ciudad se muestran en la Tabla 5.1.

Ciudad No.	R^2	Ciudad No.	R^2
1	0,9738	9	0,9232
2	0,9678	10	0,8023
3	0,9381	11	0,9044
4	0,9543	12	0,895
5	0,9476	13	0,8999
6	0,9719	14	0,989
7	0,956	15	0,9536
8	0,939		

Tabla 5.1. Resumen de los R^2 obtenidos para cada ciudad para la relación entre Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia

5.1.4 Relación entre el Índice de Resiliencia y los costos totales de la red

La relación entre el índice de resiliencia y los costos totales de la red será un factor fundamental para el desarrollo de algoritmos que optimicen el diseño de alcantarillados. Por lo anterior, se debe analizar qué tan evidente fue la tendencia en esta relación mediante los resultados obtenidos para cada una de las ciudades.

De acuerdo a los datos obtenidos con las 15 ciudades analizadas, el mínimo costo de la red se obtendrá cuando el índice de resiliencia sea máximo. Sin embargo, la intensidad de esta relación va a variar dependiendo de la topografía del terreno, el caudal de diseño y la longitud de los tramos. Un buen ejemplo de esto va a ser la Ciudad 8, la cual obtuvo el mayor R^2 de esta relación, y se caracteriza por combinar caudales de 50 a 95 litros por segundo en un terreno con pendiente de 0%. Otra ciudad que mostró un buen desempeño en esta relación fue la número 9, la cual tiene el segundo coeficiente de determinación más alto, y combina un rango de caudales similar a la Ciudad 8, pero esta vez el terreno tiene una inclinación de 0.3%. En la Tabla 5.2 se pueden observar los diferentes R^2 según la ciudad analizada, así como la inclinación del terreno de cada una de estas.

Ciudad No.	Inclinación Terreno	R^2
1	0%	0,0019
2	0,10%	0,0991
3	1%	0,0991
4	0%	0,1023
5	0,20%	0,2717
6	0%	0,054
7	0,20%	0,2275
8	0%	0,4554

Ciudad No.	Inclinación Terreno	R^2
9	0,30%	0,4166
10	1%	0,0038
11	0%	0,2664
12	0,20%	0,3063
13	0%	0,2299
14	0%	0,1638
15	0,20%	0,4153

Tabla 5.2. Resumen de Coeficientes de Determinación según la Ciudad para la Relación de Índice de Resiliencia con Costos Totales de la red

Se puede concluir que al incluir los costos de excavación y tubería propuestas en el presente proyecto la relación entre el índice de resiliencia, también propuesto, y los costos totales de la red va a ser inversa. Sin embargo, dado el coeficiente de determinación tan variable obtenido, se recomienda seguir estudiando esta relación más para poder dar un juicio definitivo sobre él.

Finalmente, se puede observar que el concepto de pendiente propia solo servirá en el caso donde los costos de tuberías son más importantes ya que al aumentar la pendiente el diámetro disminuirá, mientras que cuando los costos de excavación resultan más

relevantes se desea que la tubería se instale lo más superficial posible reduciendo así la pendiente requerida, y por ende los costos totales de la red.

5.1.5 Relación entre la Potencia Unitaria y los costos totales de la red

Al analizar la relación entre la Potencia Unitaria y los costos totales de la red, el resultado obtenido muestra que la red será más costosa a medida que se aumente la potencia unitaria de esta. En la Tabla 5.3 puede observarse que los coeficientes de determinación para esta relación son muy variables entre las ciudades, mostrando también que la interacción entre la potencia unitaria y los costos totales de la red es más evidente que cuando se analizaron estos últimos con la resiliencia del sistema.

Ciudad No.	Inclinación Terreno	R ²	Ciudad No.	Inclinación Terreno	R ²
1	0%	0,0237	9	0,30%	0,6653
2	0,10%	0,1775	10	1%	0,0266
3	1%	0,0416	11	0%	0,5403
4	0%	0,2037	12	0,20%	0,5926
5	0,20%	0,4212	13	0%	0,5119
6	0%	0,1162	14	0%	0,1896
7	0,20%	0,3523	15	0,20%	0,6065
8	0%	0,6827			

Tabla 5.3. Variación del R² para la relación entre Costos Totales y Potencia Unitaria

Es importante mencionar que el resultado aquí obtenido difiere de lo encontrado en proyectos pasados como en los de (López Sabogal, 2011) y (Copete Rivera, 2012). Esta diferencia puede radicar en las funciones de costo empleadas, ya que puede estar ocurriendo que al incluir todos los costos de excavación mencionados previamente la relación cambie respecto a la relación obtenida cuando se empleaba la ecuación propuesta por (Navarro Pérez, 2009).

En resumen, gracias al uso de las nuevas ecuaciones, se tendrá que el costo de la red se minimiza cuando la potencia unitaria es la menor. Como se pudo ver, los resultados obtenidos son coherentes entre sí con las demás relaciones obtenidas en el desarrollo del proyecto. Sin embargo, se recomienda seguir estudiando el comportamiento de esta relación bajo el uso de las nuevas ecuaciones para poder definir un criterio claro de optimización.

5.2 Análisis de Sensibilidad

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se tomará la Ciudad Número 1, y se volverá a diseñar bajo dos nuevas condiciones: La primera, se supondrá que la tubería no tiene costo asociado, es decir que los costos de tubería son iguales a cero, y la segunda condición consistirá en suponer que la excavación para construir la red no tiene costo alguno, es decir, que los costos de excavación son iguales a cero. Posteriormente, se compararán estos resultados con la situación inicial para poder concluir al respecto.

5.2.1 Diseño Ciudad 1 Con Costos de Tubería igual a Cero

Al diseñar la Ciudad 1 suponiendo que los costos de la tubería son iguales a cero, se obtuvo el siguiente perfil del sistema:

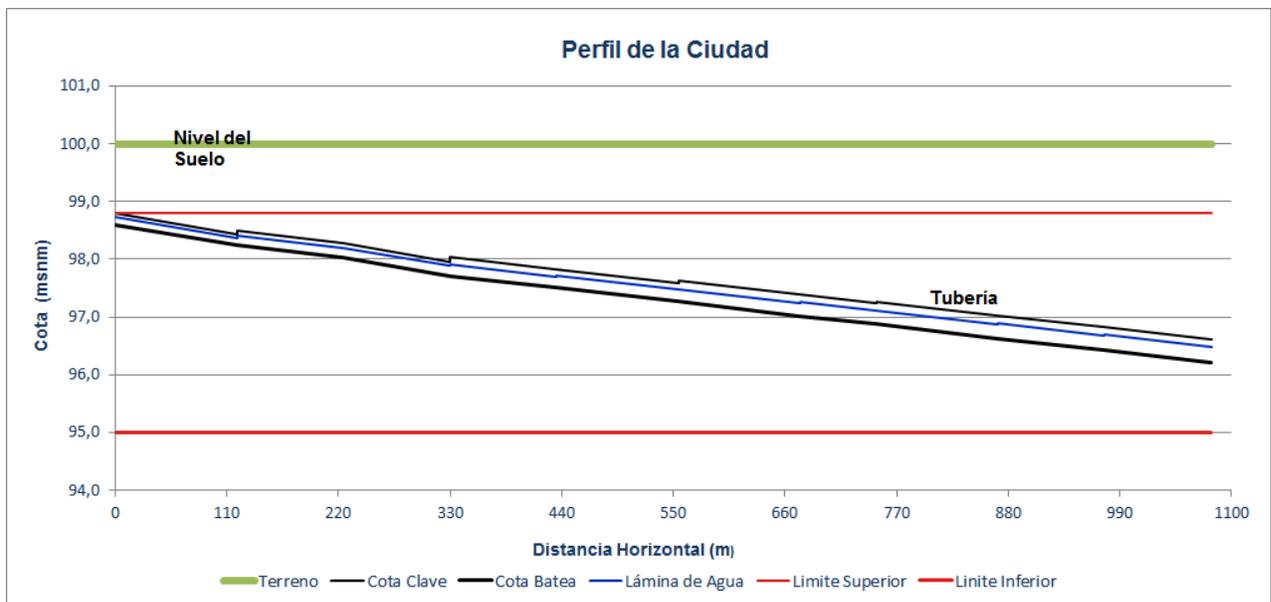


Figura 5.1. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1 con Costos de Tubería iguales a Cero

Como se puede observar en la Figura 5.1, el perfil de la tubería de alcantarillado no presenta cambios respecto al sistema diseñado incluyendo tanto costos de excavación como costos de tubería. Asimismo, al comparar la Tabla 5.4 con los resultados obtenidos inicialmente para la Ciudad 1 (ver Tabla 4.4), se puede observar que el diámetro, pendiente y profundidad normal de cada tramo no varía al excluir los costos de la tubería del análisis. La única diferencia apreciable entre las dos tablas comparadas previamente es que en el diseño sin costos de tubería es más barato, tanto por tramo como en su totalidad (ver Tabla 5.5), que cuando no se modificó la función.

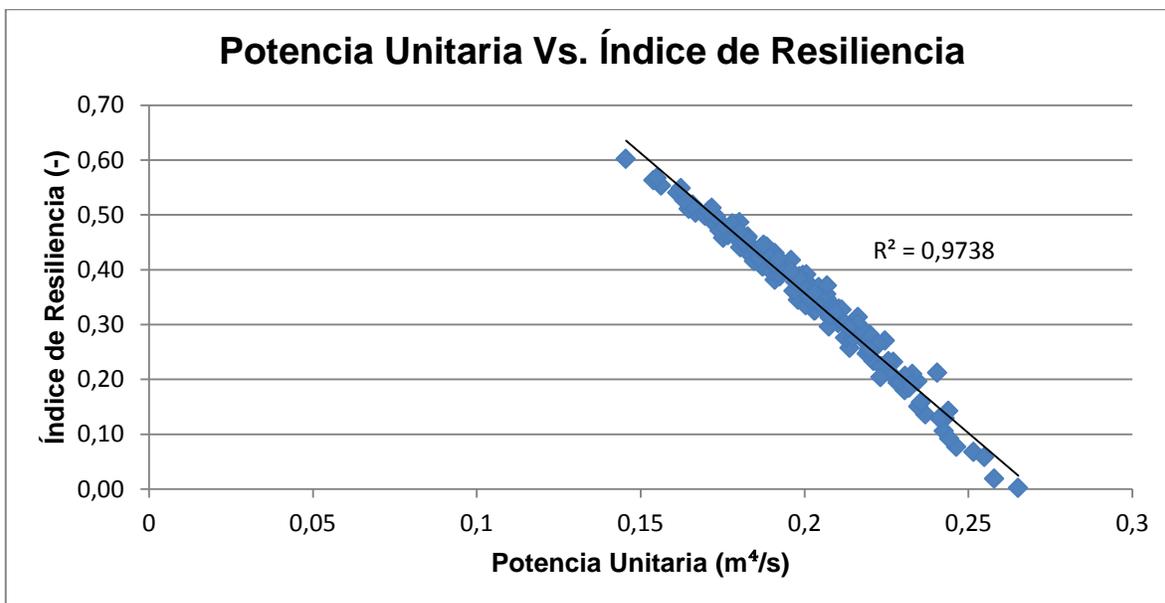
No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,129	0,0030	120	0,007	\$ 16.905.011,76	185,97
2	0,253	0,165	0,0020	105	0,006	\$ 17.590.922,91	185,45
3	0,253	0,173	0,0030	105	0,013	\$ 19.974.106,29	216,61
4	0,320	0,193	0,0020	105	0,011	\$ 23.776.278,43	237,70
5	0,320	0,220	0,0020	120	0,014	\$ 29.553.467,49	299,95
6	0,360	0,221	0,0020	120	0,017	\$ 32.210.079,52	327,12
7	0,360	0,242	0,0020	75	0,012	\$ 22.281.485,51	216,51
8	0,400	0,241	0,0020	120	0,022	\$ 36.653.509,46	372,48
9	0,400	0,259	0,0020	105	0,021	\$ 34.696.293,36	348,29
10	0,400	0,277	0,0020	105	0,023	\$ 36.920.212,92	370,34

Tabla 5.4. Resultados de Diseño para la Ciudad 1 Sin Incluir Costos de Tubería

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00352
Potencia Unitaria (m⁴/s)	0,146
Índice de Resiliencia (-)	0,6020
Volumen Total Excavado (m³)	2760,412
Costo Total (\$COP)	\$ 270.561.367,66

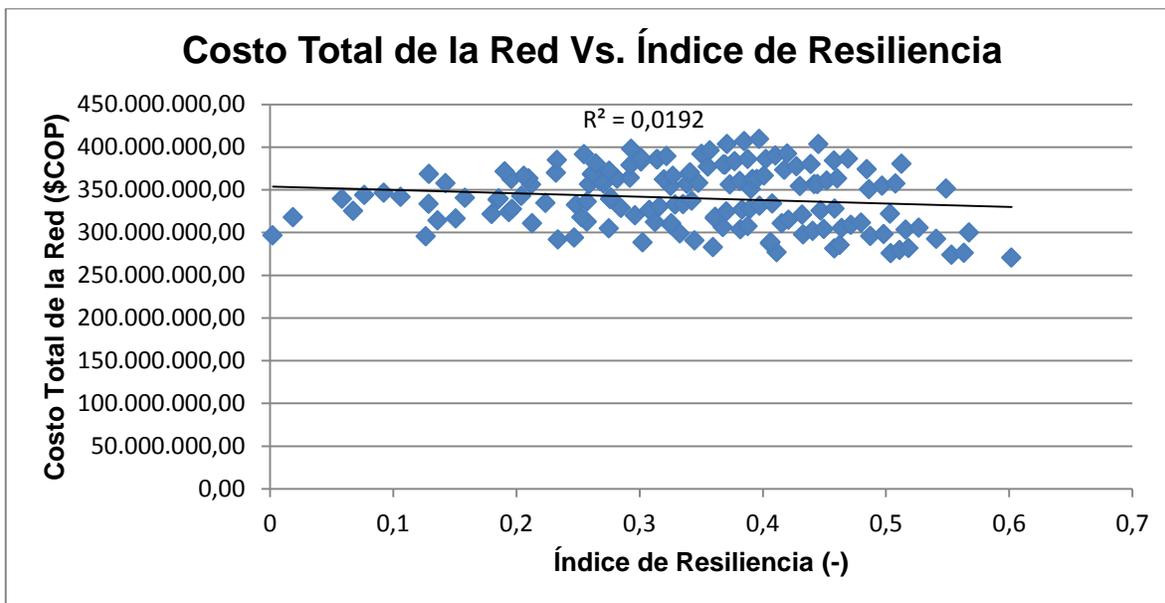
Tabla 5.5. Resultados Totales para la Ciudad 1 Excluyendo los Costos de la Tubería

Al analizar cómo se relaciona el Índice de Resiliencia con la Potencia Unitaria y los Costos Totales de la red, se puede observar en las Gráficas 5.1 y 5.2 que estos se mantienen constantes respecto al diseño inicial hecho para la Ciudad 1, y siguen las mismas relaciones analizadas con anterioridad. Lo anterior quiere decir que se cumple que a mayor confiabilidad tenga la red, representada en el índice de resiliencia, menor será la potencia disipada por esta, representada por la potencia unitaria.



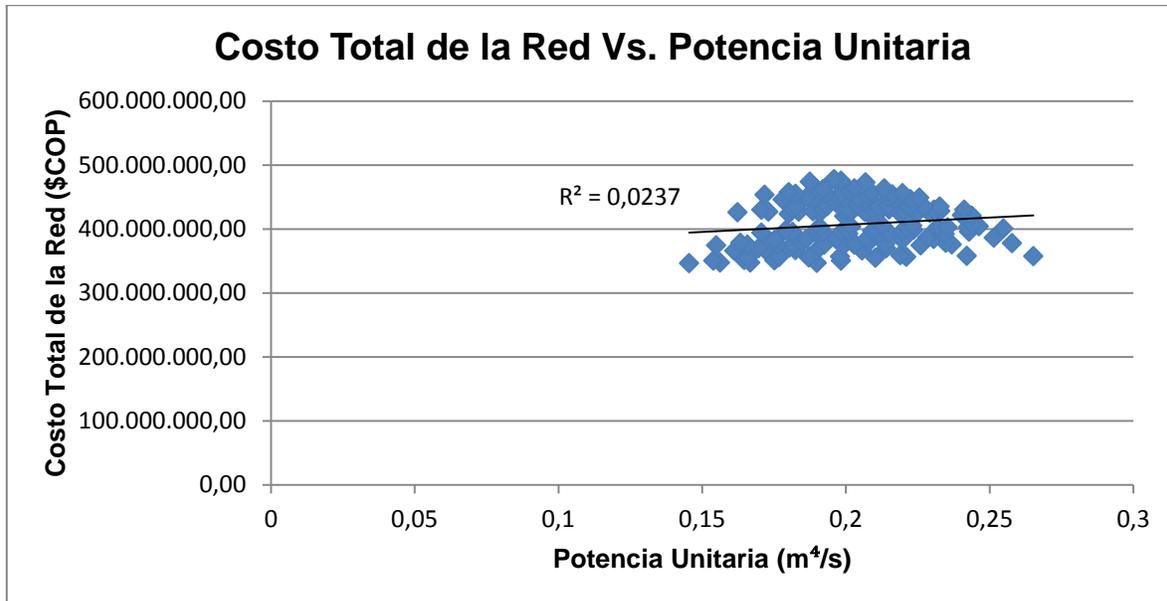
Gráfica 5.1. Relación entre la Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería

Al analizar la relación entre el Índice de Resiliencia y los costos totales de la red, se puede ver que a menor resiliencia, menor será el costo de la red. Sin embargo, esta tendencia no es muy evidente dado el bajo R^2 que presenta, así como por su dispersión.



Gráfica 5.2. Relación entre los Costos Totales de la Red y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería

En cuanto a la relación del costo total de la red con la potencia unitaria, se obtuvo que la tendencia evidenciada es opuesta a lo afirmado por López y Copete en sus proyectos, es decir, que al igual que ocurrió en las 15 ciudades analizadas, al minimizar la potencia unitaria, el costo también será el mínimo.



Gráfica 5.3. Relación entre los Costos Totales de la Red y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1 sin Costos de Tubería

5.2.2 Diseño Ciudad 1 con Costos de Excavación igual a Cero

Al diseñar la Ciudad 1 suponiendo que los costos de excavación son iguales a cero, se obtuvo el perfil del sistema mostrado en la Figura 5.2.

Como puede observarse en la Figura 5.2, al suponer que el costo de excavación es igual a cero, el diseño va a cambiar bastante respecto a la situación inicial. Para evidenciar mejor los cambios ocurridos se debe observar la Tabla 5.6, en donde al compararla con la Tabla 5.4 se puede ver que los diámetros de los tramos 6 en adelante se hicieron más grandes, así como sus pendientes, y por esta razón al excluir los costos de excavación el diseño se enterrará más, incluso hasta alcanzar el límite inferior del terreno, el cual en ninguna ciudad se alcanzó. Lo descrito anteriormente es un resultado esperado, ya que al no incluir los costos de excavación ya no se está penalizando la pendiente, permitiendo que esta tome cualquier valor sin importar su magnitud.

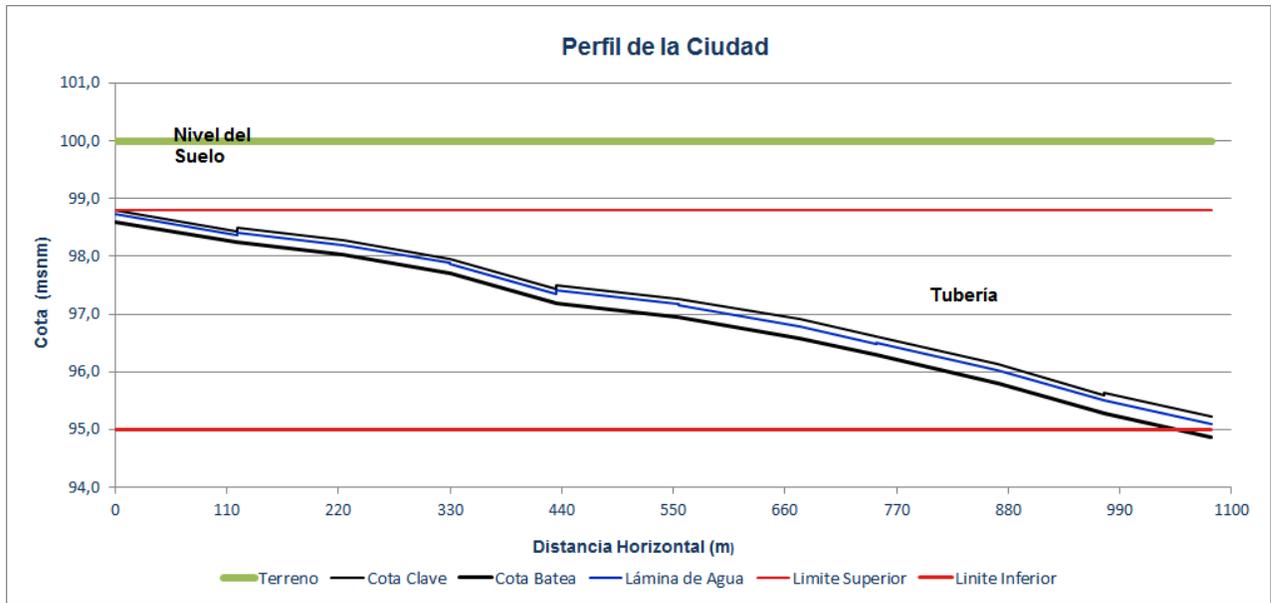


Figura 5.2. Perfil del Sistema de Drenaje de la Ciudad 1 con Costos de Excavación iguales a Cero

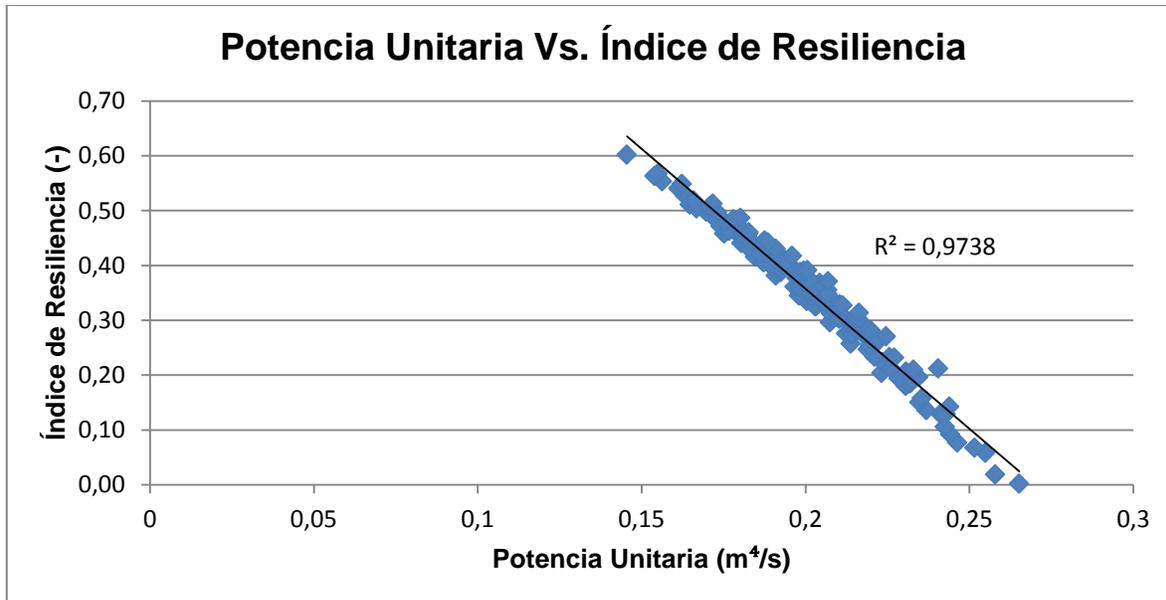
No. Tramo	Diámetro (m)	Profundidad Normal yn (m)	Pendiente S (-)	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo Total Tramo (\$COP)	Volumen Excavado (m ³)
1	0,203	0,129	0,0030	120	0,007	\$ 3.179.857,40	185,97
2	0,253	0,165	0,0020	105	0,006	\$ 4.302.704,56	185,45
3	0,253	0,173	0,0030	105	0,013	\$ 4.302.715,31	216,61
4	0,253	0,166	0,0050	105	0,026	\$ 4.302.749,73	267,91
5	0,320	0,220	0,0020	120	0,014	\$ 7.829.636,42	337,75
6	0,320	0,209	0,0030	120	0,025	\$ 7.829.656,00	378,94
7	0,320	0,205	0,0040	75	0,024	\$ 4.893.552,12	259,97
8	0,320	0,224	0,0040	120	0,043	\$ 7.829.683,40	470,52
9	0,320	0,221	0,0050	105	0,053	\$ 6.851.003,80	466,17
10	0,360	0,232	0,0040	105	0,046	\$ 8.650.259,45	510,76

Tabla 5.6. Resultados de Diseño para la Ciudad 1 Sin Incluir Costos de Excavación

Resultados Totales	
Pendiente Máxima	0,00352
Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	0,258
Índice de Resiliencia (-)	0,0187
Volumen Total Excavado (m ³)	3280,052
Costo Total (\$COP)	\$ 59.971.818,19

Tabla 5.7. Resultados Totales para la Ciudad 1 Excluyendo los Costos de la Excavación

Al analizar la relación entre potencia unitaria y el índice de resiliencia propuesto, puede verse que aunque no se tengan en cuenta los costos de excavación, este resultado se mantiene constante respecto a la situación inicial, así como a la situación en donde se excluyen los costos de la tubería.

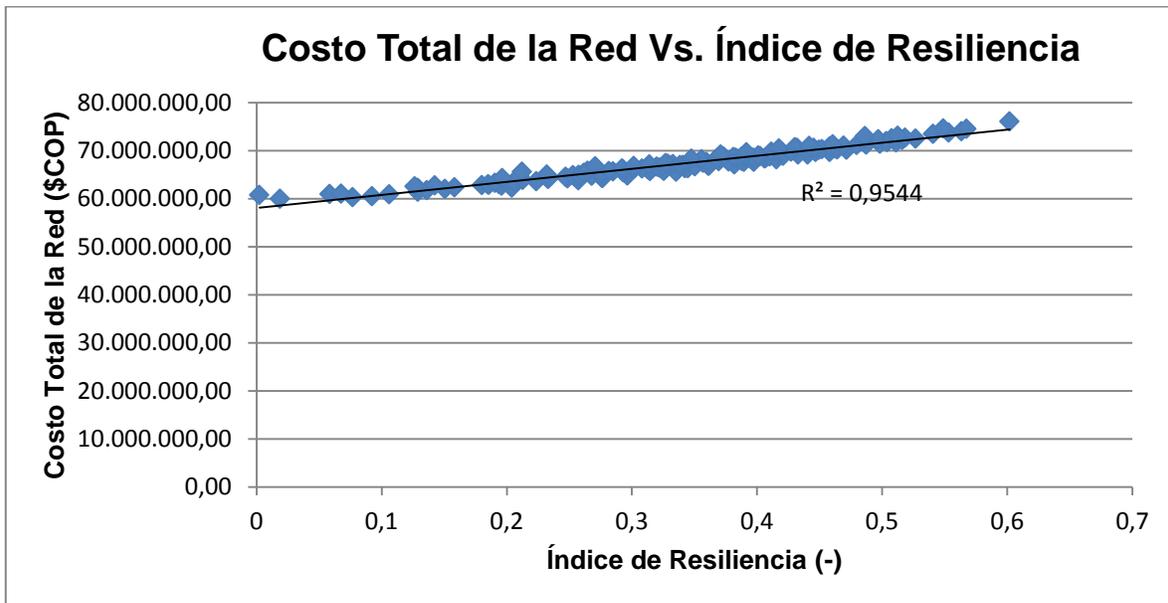


Gráfica 5.4. Relación entre la Potencia Unitaria y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación

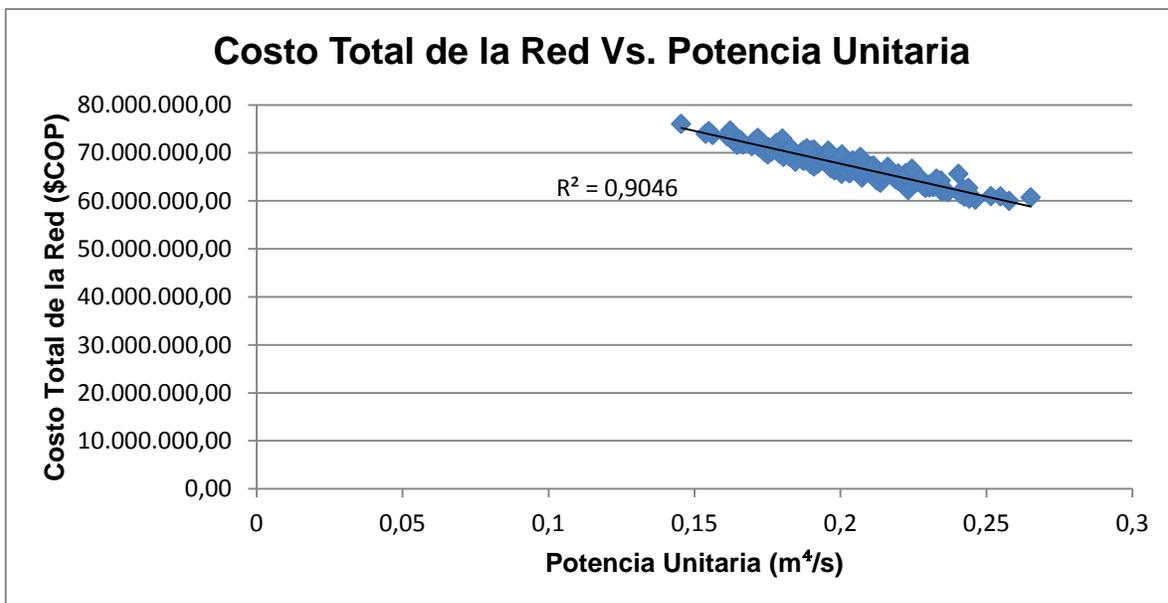
Un cambio importante en el diseño que excluye los costos de excavación se presenta en la relación entre el índice de resiliencia y los costos totales de la red. Como se muestra en la Gráfica 5.5, la relación entre estas dos variables es opuesta a lo que se demostró en las 15 ciudades analizadas, obteniendo así que el costo mínimo de la red se presentará cuando el índice de resiliencia sea mínimo. Adicionalmente, el coeficiente de determinación asociado con esta relación es muy cercano a uno, lo que significa que además de invertirse la relación respecto a lo mostrado en los diseños que incluían ambos costos, la tendencia es bastante clara.

Finalmente, al analizar la relación entre el costo total de la red y la potencia unitaria, se puede observar que su comportamiento también fue opuesto a lo mostrado para las 15 ciudades analizadas previamente. Al excluir los costos de excavación, se obtuvo que a mayor potencia unitaria, el costo total de la red es mínimo, lo cual a pesar que contradice lo hallado cuando se realizó el diseño incluyendo ambos componentes de costo, este resultado si es coherente con lo encontrado por (López Sabogal, 2011) y (Copete Rivera, 2012) en sus respectivas investigaciones. Los resultados obtenidos pueden llevar a pensar que al incluir la función de costos asociados a la excavación, a pesar que no se ha

evidenciado una relación que tenga una tendencia completamente concluyente con los criterios de confiabilidad, estos van a ser diferentes de los planteados cuando solo se tenían en cuenta los costos de la tubería (CIACUA, 2012).



Gráfica 5.5. Relación entre los Costos Totales y la Potencia Unitaria para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación



Gráfica 5.6. Relación entre los Costos Totales y el Índice de Resiliencia para la Ciudad 1 sin Costos de Excavación

Luego de realizar el análisis de sensibilidad, es interesante, en primer lugar, ver que al cambiar el peso de los componentes de la función de costo las relaciones con los criterios de confiabilidad como el índice de resiliencia y la potencia unitaria cambie tanto, a pesar que la relación entre estos dos siempre se mantuvo. A pesar de lo anterior, cuando se excluyó el costo de la tubería, si se presentaron cambios importantes en todos los demás resultados obtenidos, incluyendo desde los diámetros y pendientes del diseño hasta llegar a las relaciones de los costos con la potencia unitaria y el índice de resiliencia. Por lo anterior, se concluye que a diferencia de las RDAP, donde los costos más relevantes son los de la tubería (Saldarriaga, 2007), en alcantarillados los costos más relevantes son los de excavación, razón por la cual deben ser objeto de atención si se desea realizar un procedimiento para optimizar el diseño de este tipo de sistemas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El planteamiento de las funciones de costo asociadas con la excavación se consideró pertinente dado que en investigaciones previas no se consideraban muchos de los aspectos involucrados en la construcción de alcantarillados como lo era el relleno de la zanja, o el entibado de esta, dando así la posibilidad que por su inclusión en la función de costo; este componente resultó más relevante que el asociado con la tubería.
- En el diseño de sistemas de drenaje urbano el componente más importante de la función de costos es el asociado con la excavación, razón por la cual al intentar optimizar el costo del diseño, el diseñador se debe centrar en características del sistema como la pendiente de la tubería y la profundidad a la que esta se encuentra para asegurar que los costos constructivos sean mínimos.
- El planteamiento del índice de resiliencia para alcantarillados, como pudo observarse, tuvo problemas al ser relacionado con los costos totales de la red ya que no presentó tendencias que permitieran guiar el proceso de optimización. Por esta razón, a pesar que se tuvo una buena primera aproximación, se recomienda seguir investigando en la definición de este concepto en las redes de alcantarillados, así como de otros criterios de confiabilidad que permitan orientar el diseño adecuadamente.
- Con base en los resultados obtenidos, se podría concluir que para el diseño optimizado de alcantarillados el índice de resiliencia no resultó ser tan útil, y que por lo tanto se debería seguir utilizando el criterio de la potencia unitaria propuesto en investigaciones anteriores. Sin embargo, como se demostró en el presente proyecto de grado, con la inclusión de los costos de excavación se deja de cumplir la relación entre potencia unitaria y costos totales de la red como había sido planteada previamente, y aunque no se obtuvo una tendencia evidente con ninguno de los dos criterios de confiabilidad analizados, se recomienda seguir analizando otros criterios que si puedan llegar a ser lo suficientemente concluyentes para orientar el diseño de sistemas de drenaje urbano en donde se incluyan los costos tanto de la tubería como los de excavación.
- El concepto de Pendiente Propia resultó no ser útil cuando los costos de excavación son los más importantes de la red. Esto se puede explicar ya que al aumentar la pendiente se está reduciendo el diámetro de la tubería, situación deseada cuando priman los costos de la tubería; cuando priman los costos de excavación la situación deseada es que la tubería sea instalada lo más superficial posible, reduciendo así la pendiente del sistema e invalidando las pendientes propias.

-
- Para futuras investigaciones, se recomienda emplear en el análisis un rango más amplio de inclinaciones del terreno, así como diferentes combinaciones de este parámetro. Asimismo se espera que al probar con pendientes mayores se pueda solucionar lo ocurrido al diseño cuando se tienen terrenos con pendientes grandes (superiores al 1%).
 - Se observó que para tramos cortos (menores a 60 metros de longitud) se obtuvieron los menores costos totales, así como coeficientes de determinación aceptables en las relaciones tanto del índice de resiliencia como de la potencia unitaria con los costos constructivos totales. La reducción en los costos era de esperarse porque la longitud total de la red es casi la mitad que en las demás redes; sin embargo es interesante el comportamiento que presentan los criterios de confiabilidad en los casos donde la longitud es corta. Por lo anterior, se recomienda para futuras investigaciones analizar el comportamiento e importancia de la longitud de cada tramo dentro del diseño, así como la relación de esta variable con los criterios de confiabilidad empleados, para determinar de forma concluyente como estos se relacionan con los costos totales de la red.

7. BIBLIOGRAFÍA

- APCI. (2012). *American Pipe and Construction International*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2012, de http://www.apci.com.co/archivosftp/Precios/AP_precios.pdf
- ASCE. (2007). *Gravity Sanitary Sewer: Design and Construction*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2009). *Urban Drainage*. Oxon: Spon Press.
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá D.C: McGraw Hill.
- CIACUA. (2012). *Informe CIE-AGUA*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Construdata. (2011). Alcantarillado, Sumideros y Pozos.
- Copete Rivera, D. A. (2012). *Diseño Hidráulico Optimizado de Redes de Alcantarillado Usando los Conceptos de Potencia Unitaria y Pendiente Lógica*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Corporación Autónoma Regional del Cauca. (Marzo de 1999). *Construcción de Redes de Alcantarillado Sanitario y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Municipio de Toribio - Cauca*.
- DANE. (Noviembre de 2012). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Recuperado el Noviembre de 2012, de http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=76
- De Oro Vergara, J. C. (2008). *Criterios de Selección de Alternativas de Rehabilitación de Alcantarillados en Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- EAAB. (2000). *Requisitos Mínimos de Higiene y Seguridad Industrial en Excavaciones - NS 041*. Bogotá D.C.: Norma Técnica de Servicio.
- EAAB. (2003). *Entibados y Tablestacados - NS 072*. Bogotá D.C.: Norma Técnica de Servicio.
- EAAB. (2004). *Aspectos Técnicos para Cruces y Detección de Interferencias en la Construcción de Sistemas de Acueducto y Alcantarillado - NS 012*. Bogotá D.C.: Norma Técnica de Servicio.

-
- EAAB. (2006). *Excavaciones en Zanja - NS 019*. Bogotá D.C.: Norma Técnica de Servicio.
- Gobernación del Valle del Cauca. (2012). *Decreto No. 0897 de Mayo 25 de 2012*. Valle del Cauca.
- IDU. (2012). *Listado de Precios de Referencia de Actividades de Obra*. Bogotá, D.C.
- López Sabogal, D. A. (2011). *Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano Usando el Concepto de Potencia Unitaria*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Mendoza, F., & Saldarriaga, J. (2008). *Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable Incluyendo Análisis de Costo Mínimo de la Red Vs. Resiliencia de la Red*. Bogotá D.C.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogotá D.C.: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Navarro Pérez, I. (2009). *Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Ovalle Bueno, F. L. (2010). *Criterios de Diseño de Tuberías Fluyendo Parcialmente Llenas: Velocidad Mínima, Esfuerzo Cortante Mínimo y Número de Froude Cuasicrítico*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- PAVCO. (2011). *Manual Técnico "Tubosistemas para Alcantarillado NOVALOC y NOVAFORT"*. Bogotá D.C.: Gerencia de Producto PAVCO.
- PAVCO. (01 de Febrero de 2012). *Lista de Precios Para Sistemas de Tuberías y Conexiones*. Recuperado el 09 de Octubre de 2012, de http://pavco.com.co/files/data/20120313150545_s.pdf
- Penagos, J. C. (21 de Agosto de 2012). (G. CIE-AGUAS, Entrevistador)
- Saldarriaga V., J. G. (2011). *Clase de Hidráulica*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Aguas, Redes, Riegos*. Bogotá D.C.: Alfaomega.
- Swamee, P. (2001). *Optimal Design of a Sewer Line Using Linear Programming*. ASCE.

8. ANEXOS

ANEXO A. Resultados Pendientes Propias Para Cada Tramo de la Red de la Ciudad 1.

Tramo (-)	Pendiente (-)	d (m)	Yn/d (-)	Yn (m)	θ (Rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	Potencia U. (m ⁴ /s)	τ_0 (Pa)	Fr (-)	Lontigud (m)
1	0,003	0,203	0,6331	0,1285	3,6805	0,0216	0,3736	0,0578	0,9259	0,0200	0,0072	1,7018	0,8897	120
	0,01	0,151	0,6907	0,1043	3,9241	0,0132	0,2963	0,0445	1,5160	0,0200	0,0240	4,3686	1,5743	120
2	0,002	0,253	0,6526	0,1651	3,7618	0,0347	0,4759	0,0730	0,8633	0,0300	0,0063	1,4327	0,7258	105
	0,005	0,203	0,6914	0,1403	3,9270	0,0239	0,3986	0,0599	1,2567	0,0300	0,0158	2,9375	1,1247	105
	0,021	0,151	0,6889	0,1040	3,9166	0,0132	0,2957	0,0445	2,2801	0,0300	0,0662	9,1663	2,3730	105
3	0,003	0,253	0,6833	0,1729	3,8925	0,0366	0,4924	0,0743	1,0928	0,0400	0,0126	2,1877	0,8848	105
	0,009	0,203	0,6731	0,1366	3,8485	0,0232	0,3906	0,0593	1,7264	0,0400	0,0378	5,2369	1,5803	105
	0,035	0,151	0,6928	0,1046	3,9332	0,0132	0,2970	0,0446	3,0217	0,0400	0,1471	15,3060	3,1298	105
4	0,002	0,32	0,6040	0,1933	3,5608	0,0508	0,5697	0,0891	0,9845	0,0500	0,0105	1,7490	0,7803	105
	0,005	0,253	0,6551	0,1657	3,7723	0,0349	0,4772	0,0731	1,4326	0,0500	0,0263	3,5874	1,2007	105
	0,013	0,203	0,6836	0,1388	3,8937	0,0236	0,3952	0,0597	2,1208	0,0500	0,0683	7,6077	1,9163	105
	0,052	0,151	0,6962	0,1051	3,9481	0,0133	0,2981	0,0447	3,7566	0,0500	0,2734	22,7779	3,8744	105
5	0,002	0,32	0,6859	0,2195	3,9037	0,0588	0,6246	0,0941	1,0203	0,0600	0,0144	1,8472	0,7322	120
	0,006	0,253	0,6957	0,1760	3,9460	0,0373	0,4992	0,0748	1,6070	0,0600	0,0432	4,4026	1,2812	120
	0,018	0,203	0,6856	0,1392	3,9022	0,0237	0,3961	0,0597	2,5368	0,0600	0,1296	10,5446	2,2865	120
	0,072	0,151	0,6987	0,1055	3,9589	0,0134	0,2989	0,0447	4,4904	0,0600	0,5197	31,5755	4,6168	120

Tramo (-)	Pendiente (-)	d (m)	Yn/d (-)	Yn (m)	θ (Rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	Potencia U. (m ⁴ /s)	τ_0 (Pa)	Fr (-)	Lontigud (m)
6	0,002	0,36	0,6137	0,2209	3,6003	0,0655	0,6481	0,1011	1,0687	0,0700	0,0168	1,9830	0,7894	120
	0,003	0,32	0,6525	0,2088	3,7613	0,0556	0,6018	0,0924	1,2595	0,0700	0,0252	2,7180	0,9416	120
	0,008	0,253	0,6937	0,1755	3,9374	0,0372	0,4981	0,0747	1,8807	0,0700	0,0672	5,8645	1,5032	120
	0,023	0,203	0,6960	0,1413	3,9474	0,0240	0,4007	0,0600	2,9107	0,0700	0,1933	13,5433	2,5896	120
	0,096	0,151	0,6973	0,1053	3,9528	0,0133	0,2984	0,0447	5,2502	0,0700	0,8101	42,0733	5,4075	121
7	0,002	0,36	0,6735	0,2425	3,8503	0,0729	0,6931	0,1052	1,0971	0,0800	0,0120	2,0643	0,7537	75
	0,004	0,32	0,6414	0,2052	3,7148	0,0545	0,5944	0,0917	1,4681	0,0800	0,0240	3,5975	1,1125	75
	0,01	0,253	0,6997	0,1770	3,9633	0,0376	0,5014	0,0749	2,1293	0,0800	0,0600	7,3513	1,6892	75
	0,029	0,203	0,6997	0,1420	3,9633	0,0242	0,4023	0,0601	3,3075	0,0800	0,1741	17,1056	2,9292	75
	0,122	0,151	0,6990	0,1055	3,9603	0,0134	0,2990	0,0447	5,9843	0,0800	0,7374	53,5107	6,1504	76
8	0,002	0,4	0,6024	0,2409	3,5540	0,0791	0,7108	0,1113	1,1379	0,0900	0,0216	2,1833	0,8083	120
	0,003	0,36	0,6255	0,2252	3,6492	0,0670	0,6569	0,1020	1,3434	0,0900	0,0324	3,0015	0,9783	120
	0,004	0,32	0,6987	0,2236	3,9590	0,0600	0,6334	0,0947	1,4997	0,0900	0,0432	3,7175	1,0592	120
	0,013	0,253	0,6861	0,1736	3,9044	0,0368	0,4939	0,0744	2,4478	0,0900	0,1404	9,4938	1,9750	120
	0,036	0,203	0,6996	0,1420	3,9628	0,0242	0,4022	0,0601	3,7216	0,0900	0,3891	21,2333	3,2965	120
	0,152	0,151	0,6981	0,1054	3,9565	0,0134	0,2987	0,0447	6,7414	0,0900	1,6605	66,6422	6,9361	121
9	0,002	0,4	0,6470	0,2588	3,7384	0,0860	0,7477	0,1150	1,1627	0,1000	0,0210	2,2569	0,7827	105
	0,003	0,36	0,6737	0,2425	3,8512	0,0729	0,6932	0,1052	1,3709	0,1000	0,0315	3,0968	0,9416	105
	0,005	0,32	0,6897	0,2207	3,9200	0,0592	0,6272	0,0943	1,6902	0,1000	0,0525	4,6269	1,2072	105
	0,016	0,253	0,6819	0,1725	3,8865	0,0365	0,4916	0,0743	2,7382	0,1000	0,1680	11,6594	2,2208	105
	0,044	0,203	0,6974	0,1416	3,9533	0,0241	0,4013	0,0601	4,1492	0,1000	0,4624	25,9257	3,6852	105
	0,184	0,151	0,6991	0,1056	3,9606	0,0134	0,2990	0,0447	7,4794	0,1000	1,9644	80,7076	7,6862	107

Tramo (-)	Pendiente (-)	d (m)	Yn/d (-)	Yn (m)	θ (Rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	Potencia U. (m ⁴ /s)	τ_0 (Pa)	Fr (-)	Lontigud (m)
10	0,002	0,4	0,6934	0,2774	3,9361	0,0930	0,7872	0,1181	1,1829	0,1100	0,0231	2,3177	0,7522	105
	0,004	0,36	0,6443	0,2319	3,7271	0,0693	0,6709	0,1033	1,5866	0,1100	0,0462	4,0552	1,1295	105
	0,006	0,32	0,6874	0,2200	3,9098	0,0589	0,6256	0,0942	1,8663	0,1100	0,0693	5,5456	1,3369	105
	0,018	0,253	0,6981	0,1766	3,9563	0,0375	0,5005	0,0749	2,9353	0,1100	0,2079	13,2225	2,3333	105
	0,052	0,203	0,6997	0,1420	3,9635	0,0242	0,4023	0,0601	4,5474	0,1100	0,6014	30,6728	4,0271	105
	0,219	0,151	0,6996	0,1056	3,9630	0,0134	0,2992	0,0447	8,2204	0,1100	2,5894	96,0837	8,4419	107