

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA AMBIENTAL

DISEÑO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE REDES DE ALCANTARILLADO
USANDO LOS CONCEPTOS DE POTENCIA UNITARIA Y PENDIENTE LÓGICA

PRESENTADO POR:
DIEGO ANTONIO COPETE RIVERA

ASESOR:
JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA

BOGOTÁ D.C, JULIO 2012

A mi papá, Hernando Copete Ortiz
a mi mamá, Blanca Aurora Rivera
a mi hermana, Estefanía Copete Rivera
por su constante apoyo y comprensión durante
mi desarrollo personal, académico y profesional
y por darme la oportunidad de ingresar a esta
universidad para terminar 2 pregrados.

A mi familia, amigos, compañeros de estudio y
a todos los que han contribuido y han estado
a mi lado apoyándome durante esta
etapa de aprendizaje.

A mi asesor, Juan Saldarriaga, por su valiosa guía
durante el desarrollo de este proyecto de grado
y a la Universidad de los Andes, por ser una
excelente universidad y un segundo hogar
en esta etapa universitaria.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo General	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	3
2.	Marco teórico	4
2.1.	Drenaje Urbano	4
2.1.1.	Significado e importancia.....	4
2.1.2.	Efecto de la Urbanización	5
2.1.3.	Tipos de sistemas de drenaje urbano	7
2.1.4.	Componentes del sistema de drenaje urbano	8
2.1.5.	Problemas en las redes de drenaje urbano.....	8
2.1.6.	Sistemas Integrados de Drenaje Urbano	10
2.2.	Diseño de redes de drenaje urbano.....	11
2.2.1.	Fórmulas de diseño.....	11
2.2.2.	Restricciones	14
2.3.	Criterio de confiabilidad (Potencia unitaria).....	15
2.4.	Optimización por medio de Algoritmos Genéticos (AG)	16
2.4.1.	Metodología de aplicación	17
3.	Metodología de diseño	19
3.1.	Metodología para el diseño de tramos individuales	19
3.1.1.	Pendiente Lógica.....	24
3.1.2.	Ejemplo de diseño	24
3.2.	Metodología para el diseño de redes de alcantarillado.....	26
3.2.1.	Algoritmo de poda.....	28
3.3.	Metodología de optimización.....	31
3.3.1.	Relación costos vs. confiabilidad	31
3.3.2.	Aplicación del criterio Wu a la Red de Drenaje Urbano.....	34
4.	Resultados y Análisis	36
4.1.	Ciudad 1 de 9 tramos.....	36
4.2.	Ciudad 2 de 11 tramos.....	39
4.3.	Ciudad 3 de 9 tramos.....	42
4.4.	Ciudad 4 de 10 tramos.....	45
4.5.	Ciudad 5 de 10 tramos.....	48



4.6.	Ciudad 6 de 10 tramos.....	50
4.7.	Ciudad 7 de 9 tramos.....	53
4.8.	Ciudad 8 de 9 tramos.....	56
4.9.	Ciudad 9 de 10 tramos.....	59
4.10.	Ciudad 10 de 9 tramos.....	62
4.11.	Ciudad 11 de 9 tramos.....	65
4.12.	Ciudad 12 de 9 tramos.....	68
4.13.	Ciudad 13 de 9 tramos.....	71
4.14.	Ciudad 14 de 9 tramos.....	74
4.15.	Ciudad 15 de 9 tramos.....	77
4.16.	Ciudad 16 de 9 tramos.....	80
4.17.	Ciudad 17 de 9 tramos.....	83
4.18.	Ciudad 18 de 10 tramos.....	86
4.19.	Ciudad 19 de 10 tramos.....	89
4.20.	Ciudad 20 de 11 tramos.....	92
4.21.	Ciudad 21 de 11 tramos.....	95
4.22.	Ciudad 22 de 12 tramos.....	98
4.23.	Análisis de resultados.....	101
4.24.	Ciudad 23 de 9 tramos con pendiente de 1%	101
4.25.	Tendencias regulares e irregulares	106
4.26.	Calculo de flechas	107
4.27.	Costos Computacionales	111
4.28.	Cálculo de regresiones multivariadas.....	112
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	115
6.	Referencias.....	116
7.	Anexos.....	118

Lista de Figuras

Figura 2.1. Interacción del dreña urbano con el publico y el medio ambiente. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2011).	4
Figura 2.2. Cambios hidrológicos debido a la urbanización. Estado pre urbano (Altarejos García, 2009).	6
Figura 2.3. Cambios hidrológicos debido a la urbanización. Estado urbano (Altarejos García, 2009).	6
Figura 2.4. Ejemplo de sobrecargas en la red de alcantarillado.	9
Figura 2.5. LET y LGH para una tubería que fluye parcialmente llena. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011).	12
Figura 2.6. Propiedades geométricas de la sección transversal en tuberías parcialmente llenas. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011)	13
Figura 2.7. Metodología de los Algoritmos Genéticos.	18
Figura 3.1. Primera parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012)..	21
Figura 3.2. Segunda parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).	22
Figura 3.3. Tercera parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012)..	23
Figura 3.4. Algoritmo de poda, el cual filtra las alternativas viables. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).	29
Figura 3.5. Algoritmo para la creación de la matriz de diseño.	30
Figura 3.6. Costos constructivos en función del diámetro de la tubería.	32
Figura 3.7. Costos constructivos en función de la pendiente de la tubería.	33
Figura 3.8. Gráfica de contorno del costo en función de la pendiente y el diámetro, utilizando el software Minitab 16®.	33
Figura 3.9. Criterio de Wu. La línea de gradiente hidráulico óptima económica en RDAP, forma una curva cóncava hacia arriba con una flecha de 15% de la altura total disponible en el centro y con respecto a la línea AB (Saldarriaga, 2007).	35
Figura 3.10. Tubería de drenaje urbano que fluye parcialmente llena. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2011).	35
Figura 4.1. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 1.	37
Figura 4.2. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 1.	38
Figura 4.3. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 1.	38
Figura 4.4. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 1.	39
Figura 4.5. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 2.	40
Figura 4.6. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 2.	41
Figura 4.7. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 2.	41



Figura 4.8. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 2. 42
Figura 4.9. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 3. 43
Figura 4.10. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 3. 44
Figura 4.11. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 3..... 44
Figura 4.12. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 3. 45
Figura 4.13. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 4. 46
Figura 4.14. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 4. 47
Figura 4.15. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 4..... 47
Figura 4.16. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 4. 48
Figura 4.17. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 5. 49
Figura 4.18. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 6. 51
Figura 4.19. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 6. 51
Figura 4.20. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 6..... 52
Figura 4.21. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 6. 52
Figura 4.22. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 7. 54
Figura 4.23. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 7. 54
Figura 4.24. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 7..... 55
Figura 4.25. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 7. 55
Figura 4.26. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 8. 57
Figura 4.27. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 8. 57
Figura 4.28. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 8..... 58
Figura 4.29. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 8. 58
Figura 4.30. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 9. 60
Figura 4.31. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 9. 60
Figura 4.32. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 9..... 61
Figura 4.33. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 9. 61
Figura 4.34. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 10. 63



Figura 4.35. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 10.	63
Figura 4.36. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 10.....	64
Figura 4.37. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 10.	64
Figura 4.38. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 11.	66
Figura 4.39. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 11.	66
Figura 4.40. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 11.....	67
Figura 4.41. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 11.	67
Figura 4.42. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 12.	69
Figura 4.43. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 12.	69
Figura 4.44. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 12.....	70
Figura 4.45. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 12.	70
Figura 4.46. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 13.	72
Figura 4.47. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 13.	72
Figura 4.48. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 13.....	73
Figura 4.49. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 13.	73
Figura 4.50. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 14.	75
Figura 4.51. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 14.	75
Figura 4.52. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 14.....	76
Figura 4.53. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 14.	76
Figura 4.54. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 15.	78
Figura 4.55. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 15.	78
Figura 4.56. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 15.....	79
Figura 4.57. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 15.	79
Figura 4.58. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 16.	81
Figura 4.59. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 16.	81
Figura 4.60. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 16.....	82



Figura 4.61. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 16.....	82
Figura 4.62. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 17.	84
Figura 4.63. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 17.	84
Figura 4.64. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 17.....	85
Figura 4.65. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 17.	85
Figura 4.66. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 18.	87
Figura 4.67. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 18.	87
Figura 4.68. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 18.....	88
Figura 4.69. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 18.	88
Figura 4.70. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 19.	90
Figura 4.71. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 19.	90
Figura 4.72. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 19.....	91
Figura 4.73. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 19.	91
Figura 4.74. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 20.	93
Figura 4.75. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 20.	93
Figura 4.76. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 20.....	94
Figura 4.77. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 20.	94
Figura 4.78. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 21.	96
Figura 4.79. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 21.	96
Figura 4.80. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 21.....	97
Figura 4.81. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 21.	97
Figura 4.82. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 22.	99
Figura 4.83. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 22.	99
Figura 4.84. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 22.....	100
Figura 4.85. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 22.	100
Figura 4.86. Vista perfil de una distribución de 3 tuberías para un terreno con pendiente.	102
Figura 4.87. Algoritmo de poda para ciudades que presentan pendiente.	103



Figura 4.88. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 23.	105
Figura 4.89. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 23.	105
Figura 4.90. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 23.	106
Figura 4.91. Porcentajes de flechas reales de todas las ciudades.	109
Figura 4.92. Porcentajes de flechas ajustadas para todas las ciudades.	109
Figura 4.93. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 9 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).	110
Figura 4.94. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 9 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).	110
Figura 4.95. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 9 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).	111
Figura 4.96. Variación de los coeficientes de determinación (R^2) para la regresión lineal y potencial en todas las ciudades.	114
Figura 7.1. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 1 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).	118
Figura 7.2. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 1.	118
Figura 7.3. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 2 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).	119
Figura 7.4 Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 2.	119
Figura 7.5. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 6 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).	120
Figura 7.6. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 6.	120
Figura 7.7. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 13 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).	121
Figura 7.8. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 13.	121
Figura 7.9. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 1. ...	122
Figura 7.10. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 2. .	122
Figura 7.11. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 3. .	123
Figura 7.12. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 4. .	123
Figura 7.13. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 5. .	124
Figura 7.14. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 6. .	124
Figura 7.15. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 7. .	125
Figura 7.16. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 8. .	125
Figura 7.17. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 9. .	126



Figura 7.18. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 10. 126
Figura 7.19. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 11. 127
Figura 7.20. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 12. 127
Figura 7.21. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 13. 128
Figura 7.22. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 14. 128
Figura 7.23. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 15. 129
Figura 7.24. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 16. 129
Figura 7.25. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 17. 130
Figura 7.26. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 18. 130
Figura 7.27. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 19. 131
Figura 7.28. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 20. 131
Figura 7.29. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 21. 132
Figura 7.30. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 22. 132
Figura 7.31. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 1. 133
Figura 7.32. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 2. 133
Figura 7.33. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 3. 134
Figura 7.34. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 4. 134
Figura 7.35. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 6. 135
Figura 7.36. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 7. 135
Figura 7.37. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 8. 136
Figura 7.38. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 9. 136
Figura 7.39. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 10. 137
Figura 7.40. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 11. 137
Figura 7.41. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 12. 138
Figura 7.42. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 13. 138
Figura 7.43. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 14. 139
Figura 7.44. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 15. 139
Figura 7.45. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 16. 140
Figura 7.46. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 17. 140
Figura 7.47. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 18. 141
Figura 7.48. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 19. 141
Figura 7.49. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 20. 142
Figura 7.50. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 21. 142
Figura 7.51. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 22. 143



Lista de Tablas

Tabla 3.1. Elementos Geométricos. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011)	13
Tabla 4.1. Diámetros comerciales para aguas residuales.	20
Tabla 4.2. Resultados de la ejecución de los algoritmos A2 y A3 para el tramo ejemplo.	25
Tabla 4.3. Resumen de las pendientes lógicas del tramo ejemplo.	26
Tabla 4.4. Tabla resumen de diseños individuales.	26
Tabla 4.5. Ejemplo de matriz para una ciudad de 3 tramos con 3 pendientes lógicas en cada tramo.	28
Tabla 5.1. Tramos escogidos para la Ciudad # 1, y sus características.	36
Tabla 5.2. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 1 (Solución óptima).....	37
Tabla 5.3. Tramos escogidos para la Ciudad # 2, y sus características.	39
Tabla 5.4. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 2 (Solución óptima).....	40
Tabla 5.5. Tramos escogidos para la Ciudad # 3, y sus características.	42
Tabla 5.6. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 3 (Solución óptima).....	43
Tabla 5.7. Tramos escogidos para la Ciudad # 4, y sus características.	45
Tabla 5.8. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 4 (Solución óptima).....	46
Tabla 5.9. Tramos escogidos para la Ciudad # 5, y sus características.	48
Tabla 5.10. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 5 (Solución óptima).....	49
Tabla 5.11. Tramos escogidos para la Ciudad # 6, y sus características.	50
Tabla 5.12. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 6 (Solución óptima).....	50
Tabla 5.13. Tramos escogidos para la Ciudad # 7, y sus características.	53
Tabla 5.14. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 7 (Solución óptima).....	53
Tabla 5.15. Tramos escogidos para la Ciudad # 8, y sus características.	56
Tabla 5.16. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 8 (Solución óptima).....	56
Tabla 5.17. Tramos escogidos para la Ciudad # 9, y sus características.	59
Tabla 5.18. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 9 (Solución óptima).....	59
Tabla 5.19. Tramos escogidos para la Ciudad # 10, y sus características.	62
Tabla 5.20. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 10 (Solución óptima).....	62
Tabla 5.21. Tramos escogidos para la Ciudad # 11, y sus características.	65
Tabla 5.22. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 11 (Solución óptima).....	65
Tabla 5.23. Tramos escogidos para la Ciudad # 12, y sus características.	68
Tabla 5.24. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 12 (Solución óptima).....	68
Tabla 5.25. Tramos escogidos para la Ciudad # 13, y sus características.	71
Tabla 5.26. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 13 (Solución óptima).....	71
Tabla 5.27. Tramos escogidos para la Ciudad # 14, y sus características.	74
Tabla 5.28. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 14 (Solución óptima).....	74
Tabla 5.29. Tramos escogidos para la Ciudad # 15, y sus características.	77
Tabla 5.30. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 15 (Solución óptima).....	77
Tabla 5.31. Tramos escogidos para la Ciudad # 16, y sus características.	80



Tabla 5.32. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 16 (Solución óptima).....	80
Tabla 5.33. Tramos escogidos para la Ciudad # 17, y sus características.....	83
Tabla 5.34. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 17 (Solución óptima).....	83
Tabla 5.35. Tramos escogidos para la Ciudad # 18, y sus características.....	86
Tabla 5.36. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 18 (Solución óptima).....	86
Tabla 5.37. Tramos escogidos para la Ciudad # 19, y sus características.....	89
Tabla 5.38. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 19 (Solución óptima).....	89
Tabla 5.39. Tramos escogidos para la Ciudad # 20, y sus características.....	92
Tabla 5.40. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 20 (Solución óptima).....	92
Tabla 5.41. Tramos escogidos para la Ciudad # 21, y sus características.....	95
Tabla 5.42. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 21 (Solución óptima).....	95
Tabla 5.43. Tramos escogidos para la Ciudad # 22, y sus características.....	98
Tabla 5.44. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 22 (Solución óptima).....	98
Tabla 5.45. Tramos escogidos para la Ciudad # 23, y sus características.....	104
Tabla 5.46. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 23 (Solución óptima).....	104
Tabla 5.47. Resumen del cálculo de flechas hidráulicas.....	108
Tabla 5.48. Costo Computacional Aproximado (Datos reales en negrilla).....	112
Tabla 5.49. Constantes de las regresiones lineales y potenciales de todas las ciudades.....	113



1. Introducción

Desde los inicios de la humanidad, la supervivencia de los seres humanos dependía en gran parte de lo que su entorno les proporcionaba, obligándolos a trasladarse de un lado a otro para lograr volver a reabastecerse, no solo de comida, también de nuevos refugios más seguros que les permitiera sobrevivir a diferentes tipos de amenazas, como lo serían los depredadores, el clima y hasta otros seres humanos. Este comportamiento nómada, no proporcionaba un ambiente adecuado ni seguro, obligándolos a formar grupos con otros seres humanos para asegurar una mayor probabilidad de supervivencia.

Estas comunidades que se iban formando poco a poco, demandaban otras clases de necesidades, ya no individuales, sino grupales; este tipo de comportamiento, conllevó a la creación de grupos sociales y por ende, los primeros asentamientos humanos, pasando de una vida nómada individual, donde dependían totalmente de su entorno, a una vida sedentaria en comunidad, manipulando el entorno a su favor. Esta vida en comunidad, prosperó gracias a la organización de sus individuos, puesto que cada uno de ellos tenía una labor distinta para buscar el beneficio grupal, evidenciándose en beneficio individual, lo que en consecuencia, aseguraría el éxito de la supervivencia humana.

Una vez que el ser humano pasó del nomadismo al sedentarismo, paralelamente pasó de ser un recolector y un cazador, a ser un agricultor y un ganadero, teniendo a su disposición una fuente constante de alimento, que le proporcionó estabilidad. Por lo tanto, dicha estabilidad, juntó más y más asentamientos humanos, forzándolos a permanecer en el mismo territorio y de igual manera, a tener una organización social, para evitar romper esa estabilidad. Por consiguiente, el crecimiento poblacional y la evolución tanto humana como tecnológica, logró que los seres humanos construyeran grandes ecosistemas urbanos que constituyen las ciudades y áreas metropolitanas que se observan hoy en día (Antequera, 2005).

Ha sido tan alto el éxito de supervivencia del ser humano, que hoy en día la población mundial supera más de 7 mil millones de personas y seguirá creciendo exponencialmente como lo ha venido haciendo en los últimos miles de años. Y debido al continuo incremento en la densidad poblacional, se deberán construir más y cada vez más zonas urbanas o ampliar las ya existentes, afrontando un constante reto de mantener un ambiente saludable y sostenible para sus pobladores. Así, con el aumento en la población, aumentará la interacción entre las actividades humanas y el medio ambiente, provocando un consumo masivo de los recursos naturales y un aumento incontrolable de la contaminación.

Desde tiempos antiguos, las ciudades producían ciertos tipos de contaminantes que perjudicaban la salud pública, haciendo que sus mismos pobladores se preocuparan por encontrar una solución a dichos problemas. Uno de los primeros contaminantes que tuvieron las antiguas poblaciones, como el Imperio Romano, y que hoy en día sigue siendo un problema, son las aguas lluvia. Estas aguas se contaminaban con la polución producida por la ciudad y de las aguas residuales mal manejadas, provocando la propagación de enfermedades y pestes que se intensificaban con las inundaciones, que son consecuencia directa de la impermeabilización de los suelos, resultado de la pavimentación.

En aquel momento, los Romanos fueron los primeros en encontrar una solución eficiente por medio de estructuras en forma de canales abiertos, logrando evacuar las aguas lluvia que se acumulaban en



las urbanizaciones y en las calles; no obstante, todavía las aguas residuales se disponían en letrinas. En un principio, la construcción de alcantarillados tenía como único objetivo la evacuación de aguas lluvia, pero las enfermedades presentadas durante el siglo XIX forzaron a evacuar también las aguas residuales, utilizando el mismo sistema de conductos que se usó para las aguas lluvia, lo que fue una solución rápida, eficaz y poco costosa en el momento, pero con el paso del tiempo se volvería un riesgo sanitario por ser un drenaje al aire libre.

En búsqueda de obtener unas mejores condiciones higiénicas y ambientalmente aceptables, se desarrollan los primeros sistemas de drenaje urbano, que drenaban la ciudad de manera subterránea sin afectarla; además, de que estos sistemas se continúen utilizando hoy en día, proporcionan un adecuado manejo para las aguas residuales y pluviales, las cuales se canalizan y se tratan antes de verterlas nuevamente a la red hídrica natural, disminuyendo la contaminación y por lo tanto, las consecuencias que puedan tener para las personas y para el medio ambiente.

De esta manera, los sistemas de drenaje urbano toman un papel importante, convirtiéndose en partes esenciales de una ciudad. Debido a esto, se debería garantizar la cobertura total del servicio para las zonas urbanas. Igualmente, asegurar que el servicio sea eficiente, confiable y de buena calidad. Sin embargo, este tipo de servicio ha sido deficiente en América latina y el Caribe. Según la organización mundial de la salud (OMS), en el 2008, aún 117 millones de personas no usan un servicio de saneamiento mejorado y unas 36 millones de personas no poseen una solución adecuada para la disposición de sus efluentes líquidos. (World Health Organization & UNICEF, 2010) Demostrando así, que existe un déficit de cobertura, además de una baja calidad en el servicio, lo que provoca problemas sociales y ambientales.

Por estas razones, y teniendo en cuenta la baja capacidad económica que Colombia y el resto de Latinoamérica, aún posee, el desarrollo de este proyecto busca por medio de un método optimizado de diseño de drenaje urbano, encontrar parámetros que permitan establecer una operación óptima y de bajo costo o concluir sobre los ya existentes. Y para cumplir con el objetivo, se diseñaron 23 diferentes líneas principales de redes de drenaje urbano hipotéticas, variando parámetros como pendiente, caudal y longitud de cada tramo que lo conforma. A fin de evaluar los resultados obtenidos de cada una de ellas, permitiendo realizar contrastes entre las mismas. Así se obtienen, conclusiones y recomendaciones contundentes que permitan contribuir con la disminución del déficit de cobertura del servicio de saneamiento, al generar sistemas con el menor costo posible, sin dejar de garantizar un adecuado funcionamiento de la red.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Diseñar gran variedad de redes de drenaje urbano óptimas, que cumplan con las restricciones hidráulicas estipuladas por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), variando caudales, pendientes y longitudes para finalmente escoger las redes de menor costo y el mejor comportamiento hidráulico por medio de los parámetros de confiabilidad: Potencia Unitaria y Pendiente Lógica, que ayudarán a encontrar relaciones entre diseños óptimos y parámetros de diseño.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Implementar la metodología de optimización utilizada por López Sabogal (2011) para el diseño de distintas redes de drenaje urbano.
- Realizar mejoras a la metodología empleada, que permitan obtener resultados con mayor eficiencia.
- Desarrollar un código que permita evaluar redes de drenaje urbano para terrenos que presentan pendiente.
- Diseñar redes de drenaje urbano económicas y que cumplan con los requerimientos hidráulicos.
- Aplicar el criterio de Wu (1975) sobre las redes de drenaje urbano diseñadas, para encontrar las flechas hidráulicas de las redes diseñadas.
- Realizar regresiones multivariadas para encontrar el menor costo a partir de las variables: potencia unitaria y profundidad total de construcción.
- Desarrollar perfiles hidráulicos que diferencien la distribución de demandas que se presentan sobre las redes diseñadas.



2. Marco teórico

2.1. Drenaje Urbano

2.1.1. Significado e importancia

Los sistemas de drenaje son necesarios en áreas urbanas desarrolladas, debido a la interacción entre la actividad humana y el ciclo natural del agua. Esta interacción tiene dos formas principales: la extracción de agua del ciclo natural para proporcionar un suministro de agua para la vida humana, y la cobertura de la tierra con superficies impermeables que desvían el agua lluvia lejos del sistema local natural de drenaje. Estos dos tipos de interacción dan lugar a dos tipos de agua que requieren drenaje (Butler & Davies, 2011).

El primer tipo, las aguas residuales, provienen del agua que se suministra para conservar la vida, para mantener un nivel de vida y para satisfacer las necesidades de la industria. Después de su uso, si no se drena adecuadamente, podría provocar contaminación y crear riesgos para la salud. Estas aguas residuales contienen material disuelto, sólidos finos y sólidos más grandes, procedentes de inodoros, lavamanos, lavaplatos, lavanderías, duchas, regaderas y otros usos que se le pueda dar al agua, que incluyen todos los sectores residenciales, comerciales e industriales.

El segundo tipo de agua que requiere drenaje, es el agua lluvia. Ésta proviene de la precipitación que ha caído en una zona edificada. Si las aguas pluviales no se drenan en forma apropiada, podría causar molestias, daños, inundaciones y otros riesgos para la salud. Además contiene algunos contaminantes, procedente de la lluvia, del aire o de la superficie de captación.

Los sistemas de drenaje urbano manejan estos dos tipos de agua con el objetivo de minimizar los problemas causados a la vida humana y el medio ambiente. Por lo tanto el drenaje urbano cuenta con dos interfaces principales: con el público y con el medio ambiente (ver Figura 2.1). El público está generalmente transfiriendo los desperdicios más que recibiendo un servicio de drenaje urbano (“arrojar y olvidar”), y esto puede explicar en gran parte la falta de conciencia pública y el reconocimiento de ser un servicio vital urbano (Butler & Davies, 2011).



Figura 2.1. Interacción del drena urbano con el publico y el medio ambiente. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2011).

En muchas zonas urbanas, el drenaje se basa en un sistema completamente artificial de alcantarillado: tuberías y estructuras que recolectan y tratan esta agua. Por el contrario, las comunidades aisladas o de bajos ingresos normalmente no tienen red de alcantarillado, por lo que



las aguas residuales deben ser tratadas a nivel local (en el peor de los casos no se tratan) y las aguas lluvia se drenan de forma natural en el suelo. Estos tipos de soluciones por lo general han existido cuando el grado de urbanización ha sido limitado.

Así que hay mucho más con el drenaje urbano que el simple hecho de transportar el flujo de un lugar a otro a través de un sistema de alcantarillado. En general, el drenaje urbano presenta un conjunto clásico de los problemas ambientales modernos: la necesidad de mejoras técnicas rentables y socialmente aceptables en los sistemas existentes, la necesidad de la evaluación del impacto de esos sistemas, y la necesidad de buscar soluciones sostenibles. Al igual que en todas las otras áreas de preocupación ambiental, estos retos no puede ser considerados como la responsabilidad de una sola profesión. Los responsables políticos, ingenieros, especialistas en el medio ambiente, junto con todos los ciudadanos, juegan un rol importante en el drenaje urbano, y que deberán desempeñar como sociedad (Butler & Davies, 2011).

2.1.2. Efecto de la Urbanización

El desarrollo urbano es, ante todo, una acción de impermeabilización de la superficie del terreno. La construcción de calles con pavimentos que son impermeables, la urbanización de parcelas con superficies destinadas a aparcamientos o paseos y la construcción de edificaciones suele suponer una alteración radical del funcionamiento hidrológico de una determinada zona con respecto a la situación preexistente. La consecuencia inmediata de este proceso de impermeabilización es que se produce una acumulación de agua de lluvia sobre la zona urbanizada de la que además el sistema urbano “desea” desprenderse lo más rápidamente posible: en las calles, aceras y avenidas, por seguridad vial, para evitar problemas de filtraciones a las viviendas y por confort del usuario (Altarejos García, 2009).

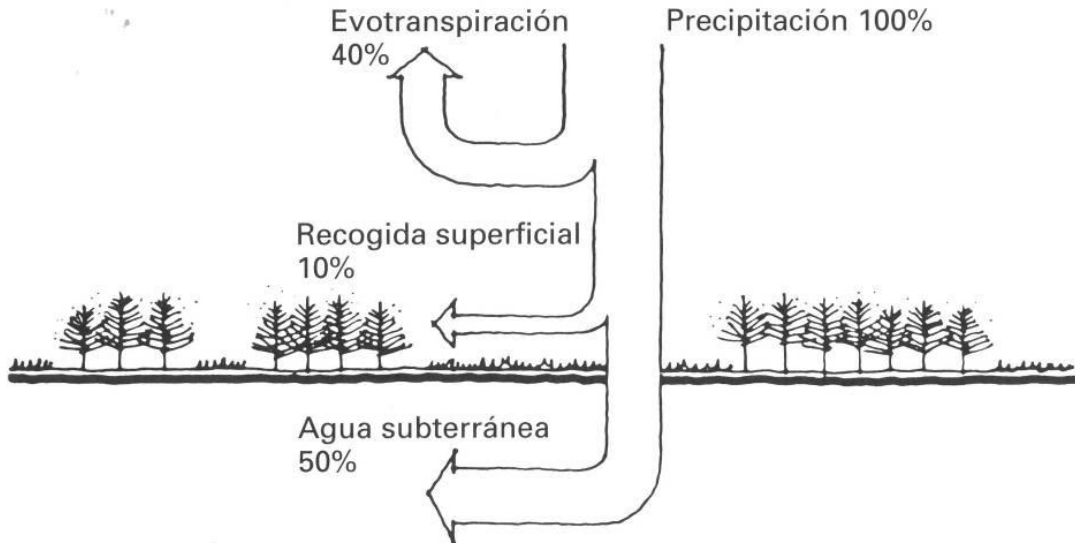


Figura 2.2. Cambios hidrológicos debido a la urbanización. Estado pre urbano (Altarejos García, 2009).

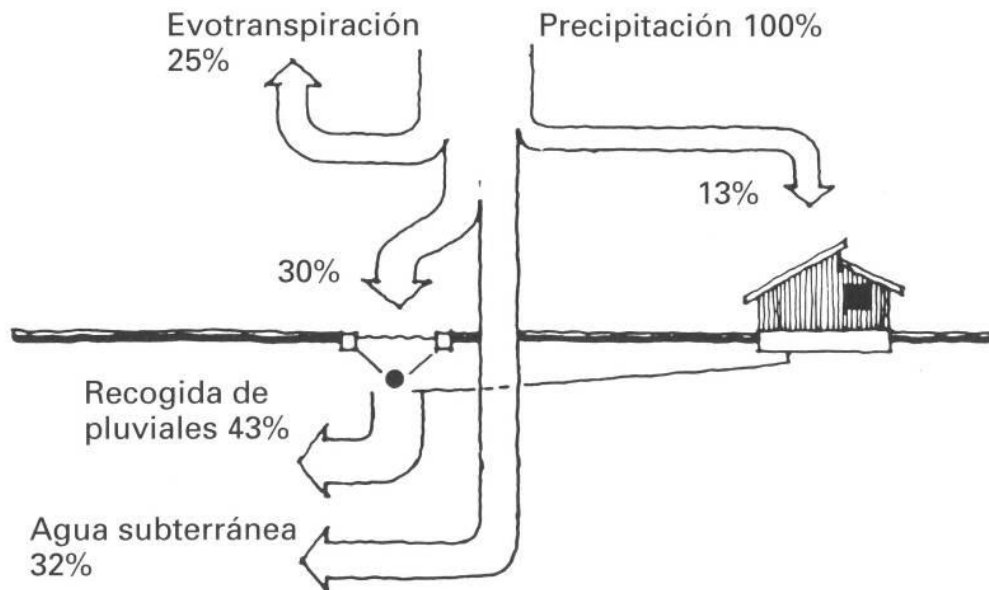


Figura 2.3. Cambios hidrológicos debido a la urbanización. Estado urbano (Altarejos García, 2009).

En la naturaleza, cuando el agua lluvia cae sobre una superficie natural, un poco de agua vuelve a la atmósfera a través de la evaporación o la transpiración de las plantas; otra se infiltra en la superficie



y se convierte en agua subterránea, y otra corre sobre el suelo y se convierten en escorrentía (Figura 2.2). Por el contrario, en un ambiente artificial, como lo es un área urbana, se crean superficies impermeables que recubren el suelo provocando un aumento de la escorrentía en relación con la infiltración, y por lo tanto, un aumento en el volumen total de agua que llegará al río (Figura 2.3).

Por lo tanto, la escorrentía viajará más rápido a través de superficies impermeables, y a través de los alcantarillados que sobre superficies naturales. En consecuencia, el flujo aparece y desaparece más rápido, y por lo tanto el caudal máximo será mayor, aumentando el peligro de inundación repentino del río, como también del alcantarillado. Además, este aumento súbito de escorrentía causará una limpieza de la superficie, llevando con ella sedimentos y contaminantes producidos en la ciudad, y que serán llevados al río, disminuyendo la calidad del recurso hídrico al cual llega; por otra parte la infiltración reducida significa menos recargas o recargas más pobres a las reservas de agua subterránea (Butler & Davies, 2011).

Así que los efectos generales de la urbanización en el drenaje, o los efectos de la sustitución del drenaje natural por el drenaje urbano, son para producir picos más altos y más repentinos en el flujo del río, como también para introducir agentes contaminantes, y crear la necesidad de tratamientos artificiales de aguas residuales.

2.1.3. Tipos de sistemas de drenaje urbano

Existen tres tipos de sistemas de drenaje urbano: separado, combinado e híbrido. El primero de éstos se caracteriza porque el agua residual y el agua lluvia son mantenidas en tuberías separadas, por lo general ubicadas lado a lado. Los flujos de las aguas residuales varían durante el día, pero las tuberías están diseñadas para transportar el caudal máximo todo el camino hasta la planta de tratamiento de aguas residuales. Ésta puede tener diferentes tipos de tratamiento cuya complejidad varía de acuerdo con la remoción de determinados contaminantes, así como con el presupuesto disponible para la construcción y operación de las mismas. El agua de lluvia no se mezcla con las aguas residuales y por lo tanto, puede ser descargada a la corriente de agua en un punto conveniente.

En el caso de los sistemas combinados, el agua residual y el agua lluvia circulan por una misma tubería. Los caudales producidos por eventos de precipitación generalmente son mucho mayores a los del agua residual, por lo que los diámetros de estas tuberías están determinados principalmente por el agua lluvia. Otra característica importante de estos sistemas es que conducen sus aguas directamente a las Plantas de Tratamiento. Sin embargo, para que sean económicamente viables, se agregan estructuras conocidas como Alivios Combinados, las cuales permiten que exista un rebose de las aguas transportadas cuando se presentan eventos de precipitación fuerte (Navarro Pérez, 2009).

Por último, se tienen los alcantarillados híbridos, los cuales son una combinación entre sistemas separados y combinados. Estos se presentan principalmente cuando las redes deben ser construidas para zonas en expansión, y por tanto se puede tener un cambio frente al tipo de tubería existente. Lo que se pretende en estos sistemas es generar alcantarillados separados para casos en que existan cuerpos de agua cercanos, en donde las aguas lluvias puedan ser vertidas, mientras que las aguas residuales posteriormente siguen su curso en tuberías combinadas (Pavía Santolamazza, 2010).

2.1.4. Componentes del sistema de drenaje urbano

Independiente del tipo de sistema de drenaje urbano que se tenga, existen ciertos elementos que son utilizados en el diseño y construcción de cualquier red. Según Saldarriaga (2011), éstos pueden clasificarse en (López Sabogal, 2012):

- *Sumideros, canaletas y bajantes:* La finalidad de estas estructuras es la captación de las aguas lluvias o cualquier otro tipo de flujo que viaje por las superficies. Los primeros están ubicados en las calles o en los bordes de los andenes. Recogen la escorrentía que se produce como consecuencia de la impermeabilidad del suelo y la conducen hasta los tubos de la red. Por su parte, las canaletas y las bajantes son estructuras complementarias, entre sí, que recolectan la lluvia que viaja por los tejados de las edificaciones y la conduce a las tuberías de la red.
- *Tuberías:* Son las encargadas de la conducción del agua. Es el componente que mayor área ocupa en la red.
- *Cámaras de inspección:* Son estructuras hidráulicas que permiten el acceso a la red, a fin de realizar tareas de mantenimiento e inspección a la misma. Adicionalmente, se debe hacer uso de este tipo de estructuras cuando se tienen que realizar cambios en la dirección del flujo, cambios en el diámetro de las tuberías o conexiones con otras redes.
- *Cámaras de caída:* Cuando la energía con la que el flujo entra a una cámara de inspección es muy alta, es necesario disipar dicha energía para proteger la infraestructura de la red. Estas estructuras son las que se deben utilizar en estos casos; su función principal es generar una pérdida de energía en el flujo.
- *Aliviaderos:* Su función es disminuir los costos de conducción, para lo cual evacúan las aguas (mezcla de lluvias y sanitarias en caso de redes de drenaje combinadas o sólo lluvias en caso de redes de drenaje separadas) del sistema cuando éstas sobrepasan cierto nivel.
- *Sifones invertidos:* Son estructuras que son utilizadas cuando el trazado de la red pasa por un obstáculo inevitable. El principio de acción es la presurización de las tuberías.
- *Sistemas de almacenamiento temporal:* Son utilizados para retener el agua con el objetivo de disminuir los picos de caudal, y de contaminación, que se presentarían en la red en un evento de precipitación. Es recomendable que el tiempo de retención no sea muy grande debido a que se pueden presentar problemas de olores.
- *Canales abiertos:* Están diseñados para la conducción de aguas lluvias. Se recomiendan velocidades límites, el valor depende del material de construcción, para evitar problemas de sedimentación y erosión.
- *Estructuras de disipación de energía:* Son construidas en los puntos de entrega de las aguas y están diseñadas para generar un cambio de flujo supercrítico a flujo subcrítico. Para generar dicha transición es necesario minimizar la energía con la que el flujo es entregado.

2.1.5. Problemas en las redes de drenaje urbano

Las redes de drenaje urbano pueden sufrir diferentes tipos de problemas que se presentan durante la fase de operación, que no solo afectarán el rendimiento de la red; también pueden afectar gravemente al medio ambiente, y la salud pública. De allí su importancia de entenderlos y combatirlos. A continuación se muestran algunos de ellos.

2.1.5.1. Sobrecargas e inundaciones

Las sobrecargas se presentan cuando existen eventos de precipitación de magnitud superior a la de diseño, dando como resultado tuberías llenas o parcialmente llenas que transportan un flujo a presión. Las inundaciones ocurren cuando hay sobrecargas o cuando ocurre alguna circunstancia que limita la capacidad del sistema de admitir todas las escorrentías producidas por la ciudad (por ejemplo, debido a la obstrucción de los sumideros). En consecuencia, una parte muy importante de la escorrentía circulará sobre la ciudad, lo que se conoce como inundación, y se caracteriza por su rápida evolución temporal (típicamente de minutos a unas pocas horas para las cuencas mayores). Esta escorrentía superficial, cuando alcanza los bordes no urbanizados, posee una significativa capacidad erosiva, sobre todo en zonas de pendientes moderadas, con importantes repercusiones locales en los puntos de retorno a los cauces naturales (Altarejos García, 2009).

Otro efecto adverso a tener en cuenta, es el que se produce en la calidad del agua, debido al fenómeno de lavado de superficies que se genera. Así, las primeras escorrentías generadas suelen caracterizarse por su importante carga contaminante (en forma de residuos sólidos y vegetales, materia orgánica, metales pesados, etc.), muy dañina para el medio natural al que finalmente se vierte. De la misma manera, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) podrán llegar a superar su capacidad de tratamiento, y por ende a desviar las aguas a cauces naturales; vertiendo al río y al mar toda la carga contaminante procedente del fenómeno del primer lavado del terreno.



Figura 2.4. Ejemplo de sobrecargas en la red de alcantarillado¹.

Cuando una tubería es sobrecargada, no necesariamente va a generar inundaciones. Si aumenta el flujo que está entrando en el sistema de drenaje la consecuencia va a ser que la profundidad del flujo en la tubería va a aumentar. Cuando se tiene una profundidad de flujo superior al 94% del diámetro, se habrá superado la capacidad de diseño de la tubería, pues se ha establecido que en ese valor es cuando fluye el máximo caudal, un 8% mayor en comparación con el caudal a tubo lleno. Al aumentar la capacidad requerida, se incrementa el gradiente hidráulico, por lo tanto aumenta el nivel del flujo en las cámaras, y las tuberías se verán sobrecargadas. Mientras el flujo siga creciendo, el gradiente hidráulico también lo hará y se correrá el riesgo de que se presenten

¹ Tomado de <http://www.hamiltonkent.com/Images/EmbeddedImages/MH%20Cover%20Surcharge11.jpg>



inundaciones en el momento que el gradiente hidráulico alcance el nivel del suelo, como se observa en la Figura 2.4 (Navarro Pérez, 2009).

2.1.5.2. *Corrosión*

Los alcantarillados son considerados un ambiente corrosivo, donde pueden ocurrir distintas formas de corrosión. Todos los procesos de corrosión que se producen en los alcantarillados afectan adversamente tanto a la estructura como a la función de recolección de aguas residuales.

La corrosión se puede definir como un producto químico no intencional e indeseable que proviene de procesos físicos, biológicos o eléctricos que implica el deterioro gradual o destrucción de los componentes del sistema. Dicho proceso tiene como subproducto el óxido, que es simple metal (por lo general a base de hierro) que se ha oxidado de nuevo a su estado natural mediante la reacción con el oxígeno en el aire y la presencia de agua aumenta la velocidad de esta reacción.

Existen diferentes maneras en que los sistemas de recolección de aguas residuales puedan ser afectados; una de ellas es por la naturaleza electroquímica del ambiente, que tiene las características esenciales de una batería. Si las condiciones de la situación permiten que fluya una corriente de un área de mayor potencial (ánodo) a un área de menor potencial (cátodo), producirá daños importantes en ambas áreas. Otras formas de corrosión se deben ya sea a una característica física de las aguas residuales o por medio de reacciones bioquímicas e interacciones de las aguas residuales con la red de alcantarillado. Un pH bajo, una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), una presencia alta de sulfato, y las altas temperaturas pueden contribuir a una corrosión acelerada en los sistemas de recolección de aguas residuales (ASCE. American Society of Civil Engineers, 2007).

2.1.6. **Sistemas Integrados de Drenaje Urbano**

En la gran mayoría de países desarrollados, una preocupación particular es que los métodos actuales de financiamiento, regulación y gestión del drenaje urbano, son diversos; con responsabilidades divididas entre muchas organizaciones de las distintas partes interesadas. Cuando ocurre una inundación, esto hace que los temas de propiedad, responsabilidad y rendición de cuentas sean difíciles y polémicos. Para tratar de superar este problema, el concepto de drenaje integral urbano (DIU) ha sido desarrollado, y que puede definirse como "un enfoque que tiene en cuenta todos los aspectos del sistema de drenaje urbano, y produce a largo plazo, planes integrales y sostenibles para su respectiva gestión y desarrollo". Esto ocasiona que los DIU tengan los siguientes principios de (Butler & Davies, 2011):

- Adoptar un enfoque integral
- Promover el desarrollo sostenible
- Involucrar a todas las partes interesadas
- Fomentar la participación
- Acordar la propiedad y la aceptación de la responsabilidad
- Adaptación al cambio climático.

De esta manera, los países en desarrollo deberán estar a la vanguardia para seguir éstos nuevos lineamientos de desarrollo urbano que se vienen presentado actualmente (como por ejemplo los



DIU), conociendo que su adelanto y aplicación será difícil por la baja capacidad económica y problemas sociales que enfrentan estos países en comparación con los países desarrollados, pero que en un futuro, este tipo de decisiones, no se verán como una opción si no como una necesidad. Esto proveerá ventajas económicas, sociales y ambientales a largo plazo, pero con altos costos iniciales, además de cambios culturales que obligan a la población a salir de diseños y desarrollos urbanos conservadores, para este caso, los de drenaje urbano.

Este nuevo enfoque ha sido probado en Europa y la conclusión general fue que el trabajo conjunto permitió que los participantes compartan mejor la información, desarrollen una comprensión colectiva de los mecanismos de las inundaciones y los riesgos, y aprendan sobre las distintas funciones, responsabilidades y mecanismos de financiación. Además, las opciones desarrolladas de esta manera se consideraron más eficaces y beneficiosas económicamente que los desarrollados individuales. Sin embargo, los actuales mecanismos institucionales y sus responsabilidades, especialmente en los países en desarrollo, pueden hacer que sea difícil de coordinar y financiar este tipo de enfoque, provocando una urgente necesidad de desarrollar habilidades y capacidades en esta área, con el fin de tener el desarrollo sostenible urbano que tanto se desea (Gill, 2008).

2.2. Diseño de redes de drenaje urbano

El tratamiento de aguas residuales y los sistemas de recolección son uno de los gastos más importantes de los fondos públicos, pero la función de los sistemas de drenaje urbano rara vez se reconoce y los alcantarillados son raramente vistos por el público. Sin embargo, son esenciales para proteger la salud pública y el bienestar de los centros poblados. De esta manera, las diferentes etapas de diseño y construcción de las redes de drenaje urbano, requieren una comprensión de los objetivos de cada etapa del proyecto, y de los intereses de las partes involucradas.

La separación de los alcantarillados residuales y pluviales, es altamente deseable y se utiliza, con pocas excepciones, en los nuevos sistemas. Las principales ventajas de los sistemas separados, incluyendo la presencia de PTAR's, son la protección de los recursos hídricos de la contaminación y la exclusión de las aguas pluviales en los sistemas de tratamiento; por consiguiente hay un ahorro en la construcción de la planta de tratamiento y el costo operativo. Los alcantarillados combinados son frecuentes en las poblaciones más antiguas y en las poblaciones donde puede ser extremadamente difícil o costoso proporcionar sistemas separados. La separación se desea, cuando es económicamente factible, para reducir la magnitud de las instalaciones y la demanda de energía de las plantas de tratamiento (ASCE. American Society of Civil Engineers, 2007).

2.2.1. Fórmulas de diseño

El flujo de los alcantarillados es generalmente un flujo no permanente (las características no varían con el espacio pero sí con el tiempo), hasta cierto punto. Las aguas residuales varían con la hora del día, y el caudal por escorrentía varía durante el tiempo que dura la precipitación. Sin embargo, en muchos cálculos hidráulicos, no es necesario tener esto en cuenta, y las condiciones son tratadas como constantes en aras de la simplicidad (Butler & Davies, 2011).

Según lo anterior, y conociendo que las tuberías que fluyen parcialmente llenas son, en términos hidráulicos, un caso especial de los flujos en canales abiertos. Se puede considerar que el flujo en

las tuberías de redes de drenaje urbano es uniforme y permanente, donde el caudal, la velocidad y la profundidad permanecen constantes en una determinada longitud de conducto. Por lo tanto en el flujo uniforme permanente, existe un equilibrio entre las fuerzas gravitacionales y de fricción. Es decir, la energía consumida por la fricción entre el líquido y la pared de la tubería esta en equilibrio con la caída que sufre el agua a lo largo de la longitud del tubo.

Dado que la profundidad de flujo y la velocidad son constantes cuando las condiciones son uniformes, y la presión en la superficie del agua es atmosférica, la línea de energía total (LET) y la línea de gradiente hidráulico (LGH) son paralelas a la tubería, y la LGH coincide con la superficie del agua, como se observa en la Figura 2.5. De esta manera, la pendiente de la energía s_f , la pendiente de la superficie del agua s_w y la pendiente del fondo de la tubería s_o son iguales (Butler & Davies, 2011).

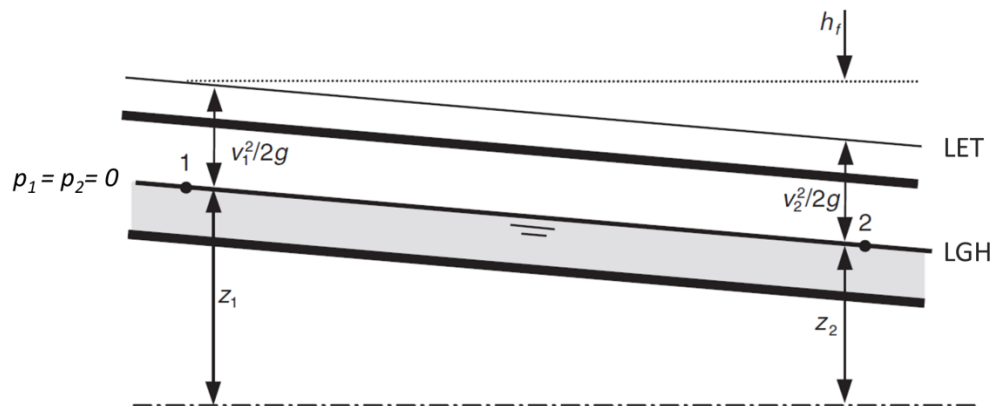


Figura 2.5. LET y LGH para una tubería que fluye parcialmente llena. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011).

De esta manera, el proceso de diseño hace necesario tener unas ecuaciones que describan las propiedades geométricas de la sección transversal en tuberías circulares parcialmente llenas, como se muestran a continuación. Éstas se deducen a partir de la Figura 2.6 y sus convenciones se encuentran en la Tabla 2.1.

$$\theta = 2 * \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y}{d} \right) \quad (2.1)$$

$$A = \frac{d^2}{8} * (\theta - \sin \theta) \quad (2.2)$$

$$P = \frac{d * \theta}{2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d}{4} * \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\theta} \right) \quad (2.4)$$

$$T = d * \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.5)$$

$$y_m = \frac{A}{T} = \frac{d * (\theta - \sin \theta)}{8 * \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2.6)$$

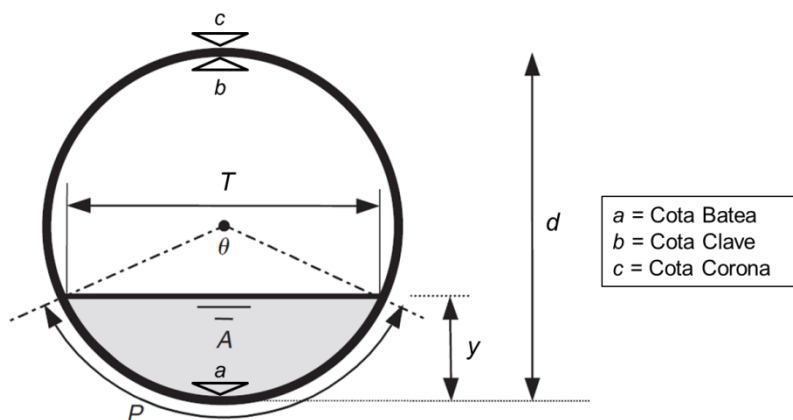


Figura 2.6. Propiedades geométricas de la sección transversal en tuberías parcialmente llenas. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011)

Tabla 2.1. Elementos Geométricos. Tomado y adaptado (Butler & Davies, 2011)

Propiedad	Símbolo	Definición	Unidades
Profundidad	y	Altura del agua por encima de la cota batea	m
Área mojada	A	Área de sección transversal del flujo	m^2
Perímetro mojado	P	Parte del perímetro del área de flujo que está en contacto con el canal	m
Radio Hidráulico	R	Radio hidráulico	m
Ancho de la superficie	T	Ancho de la superficie del agua	m
Profundidad hidráulica	y_m	Profundidad hidráulica	m
Diámetro	d	Diámetro de la tubería	m

Finalmente el diseño de un alcantarillado, además de suponer un flujo uniforme, busca calcular el diámetro de la tubería (d) y la profundidad normal de flujo (y) partiendo de los parámetros de diseño (caudal necesario a evacuar (Q), la viscosidad cinemática del fluido (u), la pendiente del terreno (S) y la rugosidad absoluta de la tubería (k_s)). Haciendo necesario calcular la velocidad (v), para comprobar si el diámetro y la profundidad escogidos tienen la capacidad suficiente de transportar el caudal de diseño; lo que en consecuencia, se convierte en un proceso iterativo.

Para calcular la velocidad se tiene dos ecuaciones distintas propuestas una por Antoine Chézy y la otra por Robert Manning, pero actualmente el diseño de alcantarillado utiliza únicamente la ecuación de Chézy, Ecuación 2.7, debido a que nuevos materiales de tubería como el PVC (el material que usa este proyecto) puede invalidar la suposición de flujo turbulento hidráulicamente rugoso, lo cual invalidaría el uso de la ecuación de Manning (López Herrera, 2011).



$$v = C\sqrt{RS} \quad (2.7)$$

donde C, es el factor de Chézy y es un factor que describe la rugosidad del canal por el cual fluye el agua. Por otro lado, se tiene la ecuación de Darcy-Weisbach, que describe las pérdidas hidráulicas que existen en las tuberías debido a la fricción. Permitiendo encontrar la relación entre estas dos ecuaciones, obteniendo que el factor de Chézy es inversamente proporcional al factor de fricción (f) y sea función de la rugosidad, el diámetro y el número de Reynolds, como se muestra en la Ecuación 2.8.

$$C = \frac{8g}{f} \quad y \quad C = f\left(\frac{k_s}{d}, Re\right) \quad (2.8)$$

donde g es la fuerza gravitacional. Finalmente, para poder calcular el factor de fricción se usa la ecuación de Colebrook-White. Después se integra ésta con las Ecuaciones 2.7 y 2.8 para obtener la ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, Ecuación 2.9, pues con esta última se diseñan las redes de drenaje urbano, ya que es válida tanto para el régimen de flujo turbulento hidráulicamente liso como para el flujo turbulento hidráulicamente rugoso.

$$v = -2\sqrt{8gRS} \log_{10} \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51u}{4R\sqrt{8gRS}} \right) , \quad Q = VA \quad (2.9)$$

2.2.2. Restricciones

A continuación se presentan las restricciones de diseño, tanto para alcantarillados de aguas residuales como para alcantarillados pluviales y combinados, que están consignadas en la normativa colombiana, RAS 2000. Ellas son especificaciones de diseño cuyo uso se recomienda, las cuales ayudan a conservar la autolimpieza y el correcto funcionamiento hidráulico de los alcantarillados. Los límites son (RAS, 2000):

- *Diámetro interno real mínimo:* Éste se propone con el fin de evitar que ocurra una obstrucción en la red debido a la entrada de objetos relativamente grandes en ésta. Para alcantarillados de aguas residuales éste es de 200 mm. Para alcantarillados de aguas lluvias este diámetro mínimo es mayor de 250 mm, pues se corre un mayor riesgo de que entren objetos grandes en las tuberías.
- *Velocidad mínima:* Si la velocidad del agua en las tuberías es muy baja, se favorecen condiciones de asentamiento de partículas lo cual conlleva a la acumulación de sedimentos en el fondo de los conductos. Se establece con el fin de asegurar que los sólidos transportados por el agua no sean sedimentados disminuyendo la capacidad hidráulica de las tuberías. Con esta velocidad mínima se está garantizando que se cumpla con una pendiente mínima la cual va a funcionar como un mecanismo de autolimpieza y va a minimizar la producción de gases de sulfuro de hidrógeno. Para alcantarillados de aguas residuales es de 0.6 m/s y para alcantarillados de aguas lluvias es de 0.75 m/s.



- *Esfuerzo cortante mínimo:* Con el fin de asegurar el arrastre de sedimentos se establece un esfuerzo cortante mínimo en la pared de la tubería de 1.5 Pa para alcantarillados de aguas residuales y de 2.0 Pa para alcantarillados de aguas lluvias.
- *Velocidad máxima:* Se determina con el fin de proteger las paredes internas de las tuberías. Para esto es primordial conocer el material que va a ser utilizado en la redes. Adicionalmente se debe considerar la capacidad de abrasión de los materiales que van a ser transportados. Por lo general se establece que lo permitido es 5 m/s y para materiales plásticos como el PVC se considera que ésta puede ser hasta de 10 m/s.
- *Pendiente mínima y máxima:* Los valores de la pendiente se restringen de manera tal que el máximo valor sea aquel para el cual se presenta la velocidad máxima, y el valor mínimo sea aquel para el cual se presenten las condiciones de auto limpieza de la tubería descritas anteriormente.
- *Relación de llenado máxima:* Para dejar espacio para la circulación de aire, es recomendable que la profundidad de la lámina de agua se encuentre entre el rango de 70% - 85%, RAS 2000. (Ovalle Bueno, 2011) recomienda que nunca se supere una relación de llenado del 80% siempre y cuando el flujo sea cuasi-crítico (número de Froude entre 0.7 y 1.5, ver Ecuación 2.10, los flujos que se encuentren dentro de este rango no serán permitidos), dado que una pequeña alteración en la energía del flujo causaría un cambio brusco en la profundidad de la lámina de agua lo que, a su vez, puede conllevar a la sobrecarga de la tubería.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\gamma_m}} \quad (2.10)$$

Para el caso de este proyecto, la relación de llenado es función del diámetro. De esta manera para diámetros menores a 500 mm la máxima relación de llenado es del 70%, para diámetros entre 500 y 1000 mm la máxima relación de llenado es del 80% y para diámetros mayores a 1000 mm la relación de llenado máxima es de 85%.

- *Profundidad de la cota clave de la tubería:* A fin de asegurar que las redes de drenaje urbano se encuentran a una profundidad que garantice la protección de las tuberías y que las descargas domiciliarias (sin sótano) puedan ser drenadas por gravedad, el RAS define que la mínima distancia entre la superficie y la cota clave de la tubería es de: 0.75 m cuando la tubería se encuentra en vías peatonales o zonas verdes, y de 1.20 m cuando ésta se encuentre en vías vehiculares. Y para controlar ciertos aspectos constructivos, así como las cargas a las cuales está sometida cada tubería que hace parte de la red, es necesario exigir una máxima profundidad a la cota clave. Según el RAS, su valor debe ser de 5 m.

2.3. Criterio de confiabilidad (Potencia unitaria)

La potencia unitaria es un parámetro que permite medir la confiabilidad del sistema, y tiene como objetivo cuantificar la energía que se pierde a lo largo de la red de drenaje urbano, por medio de la



Ecuación 2.11. Aunque este concepto se desarrolló en el 2007 por Saldarriaga & Romero, en principio para diseños de redes de distribución de agua potable (RDAP); se ha venido utilizando en drenaje urbano dando buenos resultados en el diseño de alcantarillados pero que aún se continua investigando para comprobar su veracidad completamente, como lo hizo López Sabogal, Pavía Santolamazza y Navarro Pérez, en el 2011, 2010 y 2009 respectivamente.

$$PU = Q * (h_i - h_{i+1}) \quad (2.11)$$

Como el diseño de alcantarillados se realiza bajo la suposición de flujo uniforme, las pérdidas por fricción que sufren las tuberías serán iguales a la multiplicación entre la pendiente (S) y la longitud (L) de la misma, obteniendo así la Ecuación 2.12. Siendo potencia “unitaria” debido a que esta ecuación se aplica individualmente a cada tubería que conforma el sistema.

$$PU = Q * h_f = Q * S * L \quad (2.12)$$

donde:

PU: Potencia unitaria [m^4/s]

Q: Caudal que fluye 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]

h_f : Pérdidas por fricción a lo largo de la tubería [m]

2.4. Optimización por medio de Algoritmos Genéticos (AG)

Los AG son métodos directos de búsqueda aleatoria que provienen de la optimización multidimensional no restringida, lo que hace que sea un procedimiento burdo pero que funciona aun en discontinuidades y funciones no diferenciables. Además, casi siempre encuentra el óptimo global más que el local. Su principal deficiencia es que como crece el número de variables independientes, la implementación requerida llega a ser costosa. Una ventaja de este tipo de optimización es que no toma en cuenta el comportamiento de la función pero sacrifica tiempo dando como resultado una optimización ineficiente.

Pero los avances que se han logrado desde la década de los 80's respecto a la computación y al diseño optimizado tanto de redes de drenaje urbano como de distribución de agua potable, haciendo que cada vez más investigadores utilicen estos algoritmos metaheurísticos como técnica de optimización en el diseños de alcantarillados, ya que fueron desarrollados para resolver problemas no lineales y/o discontinuos, como es el caso.

Las principales ventajas de este tipo de optimización son:

- No es necesario simplificar la función objetivo.
- Presentan menores dificultades para incluir un motor que realice cálculos hidráulicos, de tal forma que existe la posibilidad de hacer análisis globales del comportamiento de la red (incluyendo fenómenos como el de sobrecargas o represamientos).
- Permiten realizar optimizaciones multiobjetivo.

Debido a esto, y según lo mencionado por Navarro Pérez (2009) la mejor técnica de optimización para el caso de diseños de redes de drenaje urbano ha resultado ser la que se basa en AG. Por esta

razón, y por el hecho de que es una de las pocas que permite o facilita la búsqueda de múltiples objetivos de optimización, además de las ventajas mencionadas anteriormente, se desarrolló un programa en Microsoft Excel® (utilizando VBA como lenguaje de programación) en el que se aplica un AG como método de búsqueda del óptimo diseño de una determinada red.

2.4.1. Metodología de aplicación

El desarrollo de un AG se basa en los procesos de la evolución natural, es decir, la genética y la selección natural. El primero de estos determina dos características importantes para el desarrollo de un AG: el genotipo y el fenotipo de cada uno de los individuos que componen una población. En el primer caso se hace referencia al conjunto de genes de un individuo, mientras que el otro se refiere a los rasgos físicos a través de los que éstos se terminan expresando. De estas dos características, es el fenotipo el que en mayor medida se relaciona con el proceso de selección natural, ya que permite determinar la adaptabilidad del individuo a su entorno, y en esta medida, la probabilidad de que sus genes sean transmitidos a las siguientes generaciones (Navarro Pérez, 2009).

Para el caso del diseño optimizado de sistemas de drenaje urbano, cada red diseñada es un individuo de la población, cuyo genotipo está representado por el conjunto de pendientes y diámetros de todas las tuberías de la red, mientras que el fenotipo está conformado por los costos constructivos, alguno de los criterios de confiabilidad (potencia unitaria y pendiente lógica, que se explicará más adelante) y las variables hidráulicas relacionadas con las restricciones que todos los diseños deben cumplir para garantizar un adecuado funcionamiento.

El alcance de este proyecto, abarcó únicamente cierta cantidad de individuos que surgieron de los diseños individuales de una serie de tramos hipotéticos que evolucionaron a partir del concepto de pendiente lógica. Y para encontrar la solución óptima, se reprodujeron entre ellos y a partir de los individuos nuevos, se escogió el individuo de menor costo, siguiendo los pasos de un AG, como se muestra en la Figura 2.7.

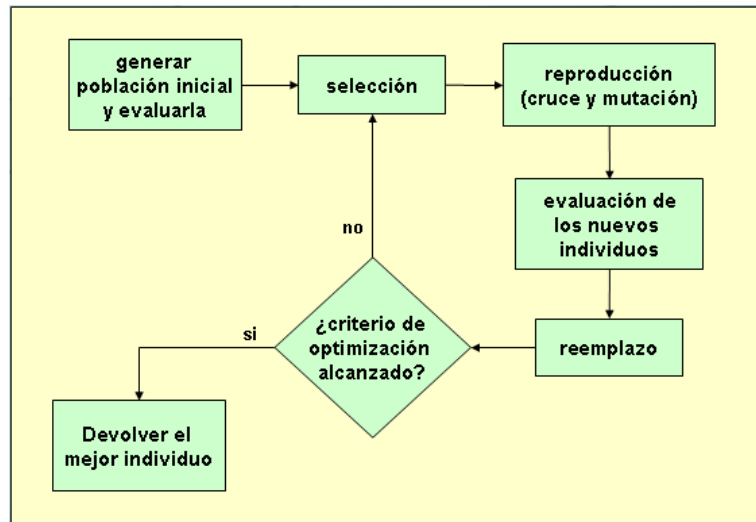


Figura 2.7. Metodología de los Algoritmos Genéticos.²

² Imagen tomada de http://atc.ugr.es/pedro/tutoriales/cursos/baeza/ae/documentacion_html_m3755cc2f.png

3. Metodología de diseño

La metodología utilizada en este proyecto para generar los diseños optimizados de redes de drenaje urbano fue propuesta por Daniel Andrés López Sabogal en el 2011, quien desarrolló una metodología para hallar el diseño óptimo de una cierta cantidad de tramos pertenecientes a una red, real o hipotética, de drenaje, utilizando como base el programa desarrollado por Freddy Leonardo Ovalle Bueno en el 2010, para realizar el diseño hidráulico de cada uno de los tramos, aplicando el concepto de pendiente lógica e implementando la metodología propuesta por Ivonne Navarro Pérez en el 2009, donde se utiliza el concepto de potencia unitaria (un criterio de confiabilidad indispensable para el diseño óptimo) y la técnica de optimización por AG.

Este procedimiento resumido anteriormente se explicará en detalle en los siguientes apartados. Además, las aplicaciones y sus respectivos algoritmos que se presentan durante este proyecto fueron programados e implementados en Microsoft Excel® por medio del lenguaje de programación VBA (*Visual Basic For Application* por sus siglas en inglés).

3.1. Metodología para el diseño de tramos individuales

Este tipo de diseño, es un proceso iterativo que consiste en verificar el caudal de diseño que puede transportar dicho tramo para cada una de las pendientes que se definieron, variando este último en múltiplos de 0.001 hasta 0.1, dando un total de 100 pendientes evaluadas. La escogencia de estos valores radica en que la etapa de construcción no permite valores más pequeños, dada la alta dificultad que representaría establecer los tramos con dichas pendientes, y con valores más grandes no se podría establecer claramente el efecto de la pendiente en los diseños (López Sabogal, 2012).

Continuando con el diseño, el material de la tubería establecido para la red de alcantarillado durante este proyecto es el PVC, porque su uso es muy generalizado, ya que se aprovechan las grandes ventajas que tiene este material tales como, resistencia química, hermeticidad (evitando infiltraciones y exfiltraciones), ligereza, impermeabilidad, pared interior lisa, larga vida útil, bajos costos, facilidad de manejo e instalación, etc. lo cual permite a iguales condiciones de pendiente y diámetro, transportar un mayor caudal, por consiguiente una mayor cantidad de sedimentos en comparación con otros tipos de tuberías.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que el procedimiento para realizar el diseño de un tramo de alcantarillado, se encuentra descrito detalladamente en el marco teórico, Apartado 2.2, pero a continuación se realiza una breve descripción, expresada por medio de diagramas de flujo que representan el algoritmo usado (Ver Figuras 3.1, 3.2 y 3.3).

Para empezar el programa, es necesario definir la cantidad de pendientes (100), su pendiente inicial (0.001), su respectiva variación (0.001), el material (PVC con rugosidad de 0.0000015 m), y la viscosidad cinemática (0.00000114 m²/s para 15°C). De esta manera, se empieza con el cálculo iterativo (ver Figura 3.3) para encontrar el diámetro nominal idóneo que transportará el caudal de diseño con una determinada longitud y pendiente característica, teniendo en cuenta que los diámetros variarán en el rango de diámetros comerciales para sistemas de drenaje de aguas residuales, mostrados en la Tabla 3.1. Además se define que la variación de la profundidad de la lámina de agua es 0.00001 m a fin de hallar el caudal de diseño con mayor exactitud.

Si el valor del caudal obtenido difiere del que se desea que fluya a través del conducto se modifica el valor de uno o más parámetros y se lleva a cabo la verificación nuevamente. El ciclo termina cuando el valor obtenido para el caudal sea igual al de diseño. Cuando el ciclo termina, lo que se obtienen son valores de todas las propiedades hidráulicas y geométricas del tramo (López Sabogal, 2012).

De esta manera, el procedimiento descrito por la Figura 3.3, permite el diseño de un único tramo para un caudal, una pendiente y una longitud determinada. Sin embargo, la gran capacidad computacional que tienen hoy en día los computadores, permite realizar este tipo de cálculos en segundos. Por lo tanto, la Figura 3.2, aplicará dicho procedimiento la cantidad de veces que se estipuló (100 pendientes), y escogiendo de éstas, las pendientes lógicas, que se explicará su significado más adelante. Y la Figura 3.1, aplicará el procedimiento anterior, a cada caudal y longitud que desarrolla este proyecto. Caudales que van desde 20 hasta 128 L/s, con aumentos de 20 L/s, y 4 longitudes (75, 90, 105 y 120 metros) para cada caudal. Obteniendo así, 220 tramos distintos, ejecutándose un total de 220,000 diseños.

Tabla 3.1. Diámetros comerciales para aguas residuales.

Diámetros Nominales (pulg)	Diámetros internos (m)
6	0.151
8	0.203
10	0.253
14	0.32
18	0.36
20	0.4
24	0.595
27	0.671
30	0.747
33	0.823
36	0.899
39	0.974
42	1.05
45	1.127
48	1.202
51	1.295
54	1.355
60	1.507

Bajo esta perspectiva, la discretización del valor de la pendiente es el eje central de este trabajo. Hoy en día la escogencia del valor de la pendiente no depende de otra cosa sino de la pericia del diseñador, causando que se pierda un amplio rango de alternativas, entre las cuales se puede

encontrar un diseño mucho más eficiente. Es por esta razón que se busca generar diseños que optimicen el uso de la pendiente (López Sabogal, 2012).

Ahora, el paso siguiente en la optimización, es la creación de las redes de drenaje urbano, puesto que hasta el momento solo se han creado tramos individuales. Por esto, es necesario crear distintas configuraciones con los tramos ya diseñados para formar múltiples redes con el objetivo de encontrar la distribución de pendientes óptima que asegura el correcto funcionamiento de la red y presentará los menores costos constructivos. Para alcances de este proyecto solamente se diseñaron redes desde 9 tramos hasta 12 tramos, puesto que si se utilizaran redes de mayor cantidad de tramos, los costos computacionales excederían el tiempo asignado para el proyecto. Esto se puede observar en la Tabla 4.48 en la página 112.

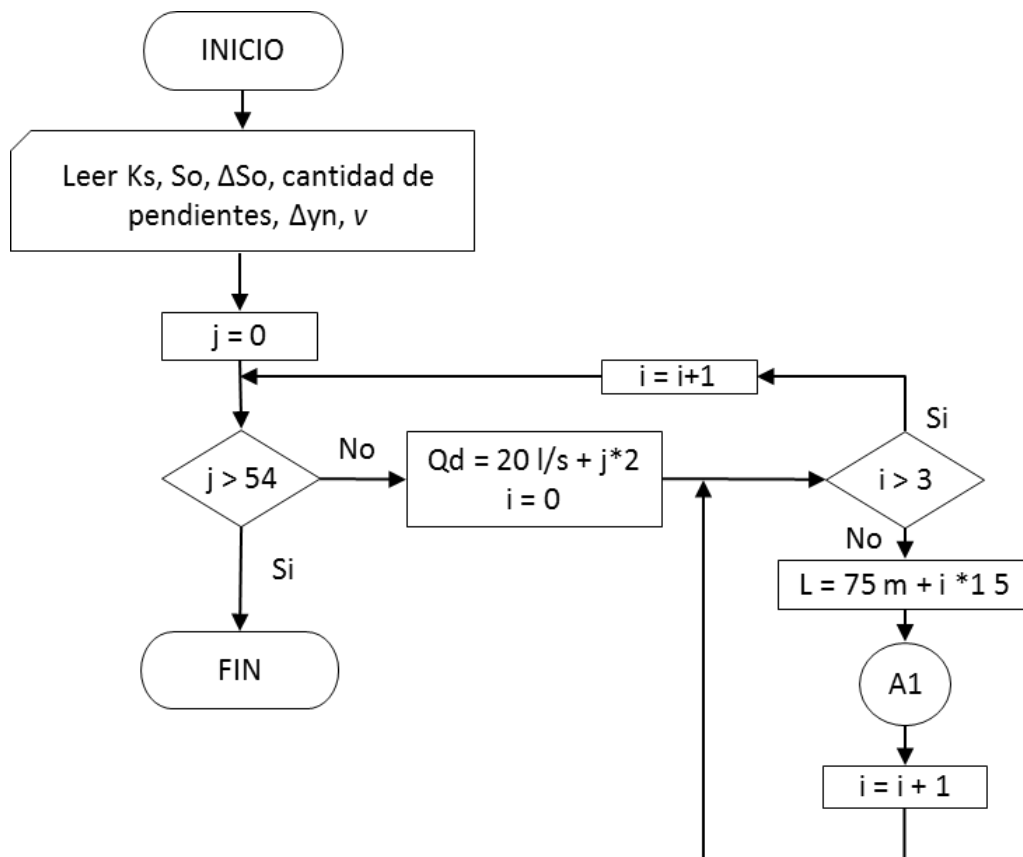


Figura 3.1. Primera parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).

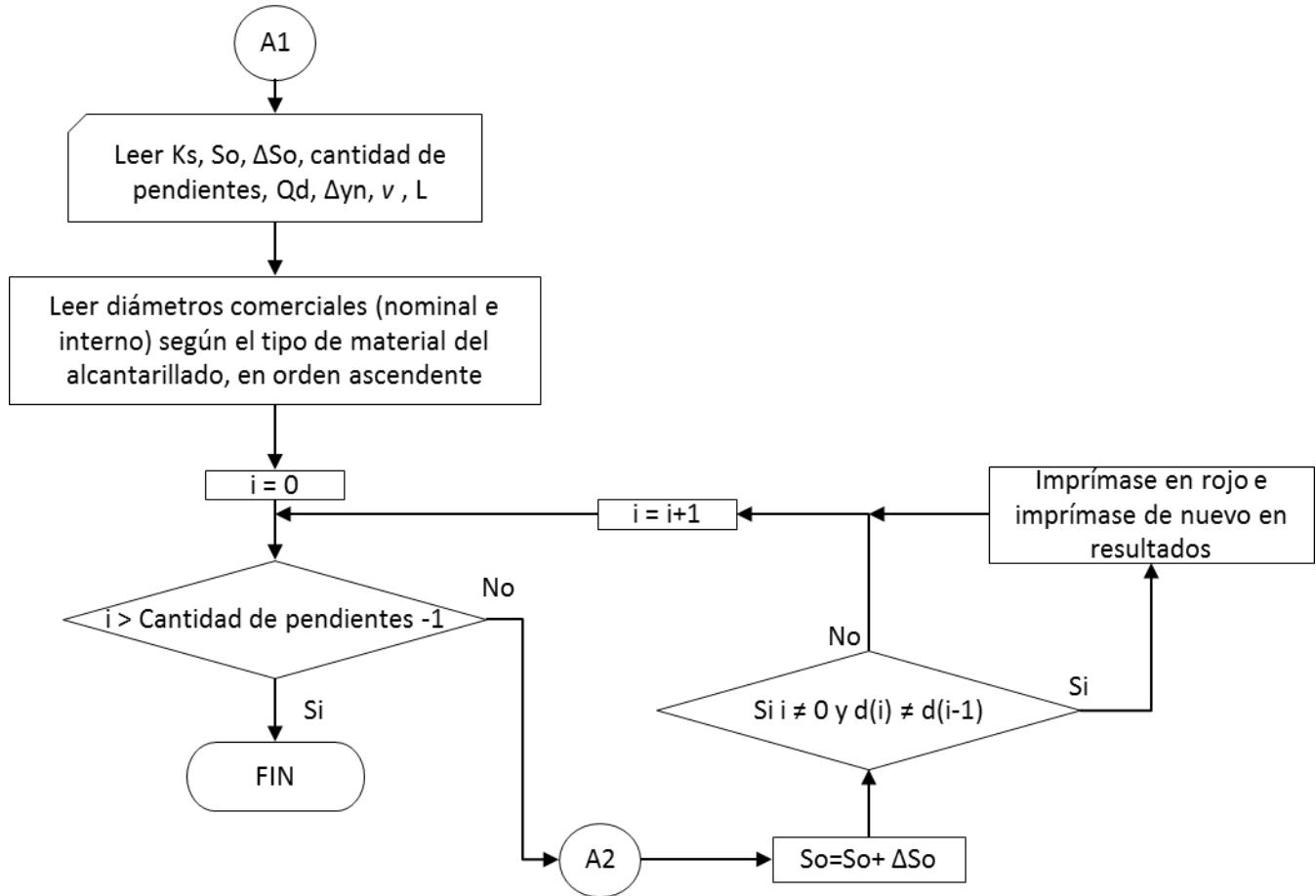


Figura 3.2. Segunda parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).

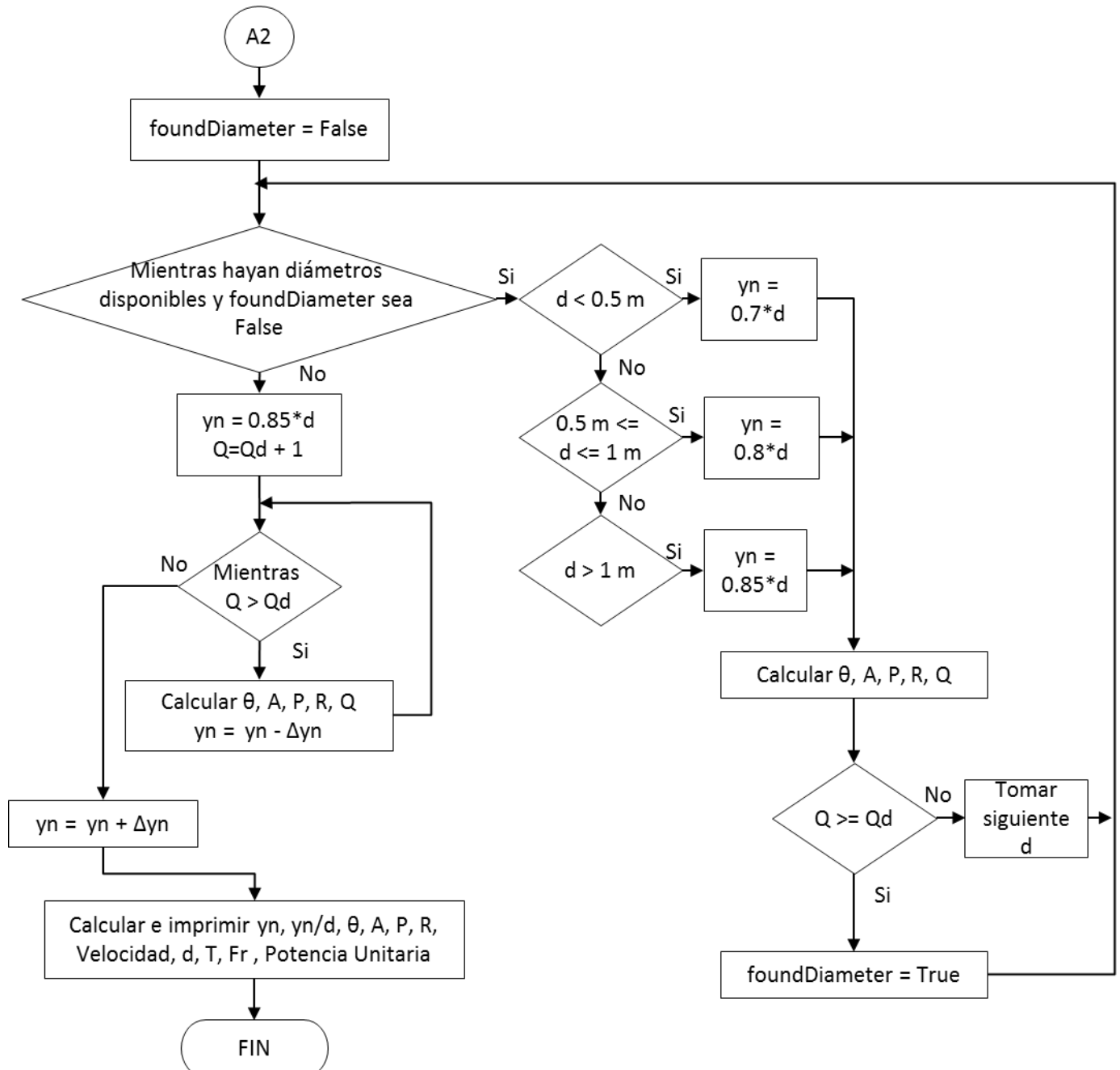


Figura 3.3. Tercera parte del algoritmo utilizado. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).

donde:

Ks: Rugosidad absoluta de la tubería [m]

So: Pendiente de la tubería [-]

ΔSo: Cambio en la pendiente; para este trabajo se tomó un valor de 0.001 [-]



- Cantidad de diseños:** número de veces que se hará el incremento de la pendiente
Qd: Caudal de diseño [m^3/s]
u: Viscosidad cinemática [m^2/s]
 Δy_n : El cambio en la profundidad de la lámina de agua [m]
 y_n : Profundidad normal de flujo [m]
 y_n/d : relación entre la profundidad normal de flujo y el diámetro real interno del conducto
L: La longitud del tramo que está siendo diseñado [m]
d: Diámetro de la tubería [m]
 θ : Ángulo subtendido entre el centro, geométrico, de la sección de la tubería y los extremos de la línea que forma la lámina de agua [-]
A: Área mojada [m^2]
P: Perímetro mojado [m]
R: Radio hidráulico [m]
Q: Caudal resultante del proceso [m^3/s]
T: Ancho en la superficie [m]
Potencia unitaria: Potencia unitaria del tramo [m^4/s]
Fr: Número de Froude [-]

3.1.1. Pendiente Lógica

La pendiente lógica es la pendiente que permite maximizar el rendimiento hidráulico de un tramo de diámetro característico, y el uso de esta pendiente permite asegurar la obtención de la mejor línea de gradiente hidráulico para las condiciones específicas dadas (un caudal y una longitud de diseño). Tal pendiente se obtiene en el momento en que el diámetro de la tubería (variando de menor a mayor) cambia, en el algoritmo de la Figura 3.2. Esto se debe a que el algoritmo funciona siempre y cuando el diámetro inicial introducido por el diseñador sea inferior al diámetro que se requiere para mover el caudal demandado. Luego, siempre se inicia el proceso con el primer dato de la Tabla 3.1. Así mismo, cuando los diámetros van aumentando, las pendientes van disminuyendo, como se observa en la Tabla 3.2. Este término fue acuñado por Saldarriaga y López Sabogal, en el 2011.

La consecuencia de este cambio es el aumento de la velocidad (mayor pendiente genera una mayor aceleración del flujo debido a la fuerza gravitacional), consecuentemente el área mojada disminuye y por lo tanto también la profundidad del flujo. De esta manera la profundidad del flujo varía en un rango cuyo límite superior es la máxima relación de llenado (ver Sección 2.2.2.) y el límite inferior está dado por la máxima capacidad que tiene la tubería con el diámetro nominal inmediatamente anterior. Dicho de otra manera, la profundidad de la lámina de agua decrece hasta que la tubería de diámetro inferior, consecutiva en la lista, tiene la capacidad hidráulica para transportar el caudal de diseño. Esta capacidad hidráulica es adquirida por efecto del aumento de la pendiente. Para ciertos valores de pendientes el comportamiento hidráulico del flujo permite que el valor del diámetro se reduzca; lo anterior optimiza el diseño si éste se toma como función de la pendiente (López Sabogal, 2012).

3.1.2. Ejemplo de diseño

Los resultados que se obtienen de la ejecución del algoritmo de la Figura 3.2, se observan en la Tabla 3.2, en otras palabras, cada fila de la tabla es el resultado del algoritmo de la Figura 3.3. Esta

tabla muestra únicamente las primeras 30 pendientes obtenidas del último tramo que se diseñó de 120 metros de longitud y un caudal de 128 L/s, donde se resaltan las pendientes lógicas (rojas). El siguiente paso es diseñar tantos tramos sea posible y para este proyecto se desarrollaron un total de 220 tramos, mostrándose solo los primeros 20 tramos en la Tabla 3.4, por efectos de espacio.

Tabla 3.2. Resultados de la ejecución de los algoritmos A2 y A3 para el tramo ejemplo.

Longitud	So	d nominal (pulg)	d interno (m)	yn (m)	yn/d	Θ Θ (rad)	A (m ²)	P (m)	R (m)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	τ (Pa)	Fr	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)
120	0.001	24	0.595	0.29413	0.49433613	3.11894	0.13702	0.92788	0.14767	0.128	0.93417	1.449	0.62191	0.01536
120	0.002	24	0.595	0.23696	0.3982521	2.73174	0.103254	0.81269	0.12705	0.128	1.23966	2.493	0.94077	0.03072
120	0.003	20	0.4	0.26338	0.65845	3.78651	0.087753	0.7573	0.11588	0.128	1.45864	3.41	0.96896	0.04608
120	0.004	20	0.4	0.23661	0.591525	3.50977	0.077394	0.70195	0.11026	0.128	1.65387	4.327	1.18969	0.06144
120	0.005	18	0.36	0.23688	0.658	3.78461	0.071025	0.68123	0.10426	0.128	1.80218	5.114	1.26163	0.0768
120	0.006	18	0.36	0.22111	0.61419444	3.60244	0.065564	0.64844	0.10111	0.128	1.95229	5.951	1.44141	0.09216
120	0.007	18	0.36	0.20918	0.58105556	3.46725	0.061352	0.62411	0.0983	0.128	2.08632	6.75	1.60149	0.10752
120	0.008	14	0.32	0.21906	0.6845625	3.89773	0.058673	0.62364	0.09408	0.128	2.18158	7.383	1.56929	0.12288
120	0.009	14	0.32	0.20903	0.65321875	3.76449	0.055653	0.60232	0.0924	0.128	2.29997	8.158	1.71657	0.13824
120	0.01	14	0.32	0.20083	0.62759375	3.65768	0.053135	0.58523	0.09079	0.128	2.40896	8.906	1.85452	0.1536
120	0.011	14	0.32	0.19392	0.606	3.56884	0.050985	0.57101	0.08929	0.128	2.51054	9.635	1.98536	0.16896
120	0.012	14	0.32	0.18796	0.587375	3.4929	0.049114	0.55886	0.08788	0.128	2.60618	10.345	2.10672	0.18432
120	0.013	14	0.32	0.18277	0.57115625	3.42719	0.047474	0.54835	0.08658	0.128	2.69621	11.042	2.22266	0.19968
120	0.014	14	0.32	0.17814	0.5566875	3.36883	0.046005	0.53901	0.08535	0.128	2.78231	11.722	2.33285	0.21504
120	0.015	14	0.32	0.17402	0.5438125	3.31707	0.044693	0.53073	0.08421	0.128	2.86398	12.392	2.44383	0.2304
120	0.016	14	0.32	0.17029	0.53215625	3.27031	0.043503	0.52325	0.08314	0.128	2.94233	13.05	2.54734	0.24576
120	0.017	14	0.32	0.16688	0.5215	3.22762	0.042413	0.51642	0.08213	0.128	3.01794	13.697	2.64211	0.26112
120	0.018	14	0.32	0.16378	0.5118125	3.18885	0.041422	0.51022	0.08118	0.128	3.09015	14.335	2.74695	0.27648
120	0.019	14	0.32	0.16091	0.50284375	3.15297	0.040504	0.50447	0.08029	0.128	3.16018	14.965	2.83123	0.29184
120	0.02	14	0.32	0.15825	0.49453125	3.11972	0.039652	0.49915	0.07944	0.128	3.22808	15.586	2.92684	0.3072
120	0.021	14	0.32	0.15578	0.4868125	3.08884	0.038862	0.49421	0.07863	0.128	3.29371	16.199	3.02314	0.32256
120	0.022	14	0.32	0.1535	0.4796875	3.06032	0.038133	0.48965	0.07788	0.128	3.35667	16.808	3.10671	0.33792
120	0.023	14	0.32	0.15134	0.4729375	3.03329	0.037443	0.48533	0.07715	0.128	3.41853	17.407	3.19089	0.35328
120	0.024	10	0.253	0.17596	0.69549407	3.945	0.037323	0.49904	0.07479	0.128	3.42952	17.609	2.7374	0.36864
120	0.025	10	0.253	0.17302	0.68387352	3.89476	0.036635	0.49269	0.07436	0.128	3.49393	18.237	2.82434	0.384
120	0.026	10	0.253	0.17031	0.67316206	3.84889	0.035994	0.48688	0.07393	0.128	3.55615	18.857	2.91222	0.39936
120	0.027	10	0.253	0.16779	0.66320158	3.80658	0.035394	0.48153	0.0735	0.128	3.61643	19.468	3.00134	0.41472
120	0.028	10	0.253	0.16541	0.65379447	3.76691	0.034823	0.47651	0.07308	0.128	3.67573	20.074	3.08195	0.43008
120	0.029	10	0.253	0.16318	0.64498024	3.72996	0.034285	0.47184	0.07266	0.128	3.73341	20.671	3.1632	0.44544
120	0.03	10	0.253	0.16112	0.63683794	3.69602	0.033785	0.46755	0.07226	0.128	3.78866	21.266	3.24447	0.4608

El paso siguiente, para facilitar el futuro diseño de las redes de alcantarillado, es aislar las pendientes lógicas de cada tramo, puesto que estas pendientes son las únicas que se usarán para el diseño de dichas redes. Este proceso lo realiza también el algoritmo de la Figura 3.2, y para el caso del ejemplo, se obtiene a partir de la Tabla 3.2, dando como resultado la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resumen de las pendientes lógicas del tramo ejemplo.

Longitud	So	d nominal (pulg)	d interno (m)	yn (m)	yn/d	Θ $\Theta(\text{rad})$	A (m ²)	P (m)	R (m)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	τ (Pa)	Fr	Unitaria (m ⁴ /s)
120	0.003	20	0.4	0.26338	0.65845	3.786511	0.087753	0.7573	0.11588	0.128	1.45864	3.41	0.96896	0.04608
120	0.005	18	0.36	0.23688	0.658	3.784614	0.071025	0.68123	0.10426	0.128	1.80218	5.114	1.26163	0.0768
120	0.008	14	0.32	0.21906	0.6845625	3.897727	0.058673	0.62364	0.09408	0.128	2.18158	7.383	1.56929	0.12288
120	0.024	10	0.253	0.17596	0.69549407	3.945003	0.037323	0.49904	0.07479	0.128	3.42952	17.609	2.7374	0.36864
120	0.069	8	0.203	0.14186	0.69881773	3.959469	0.024154	0.40189	0.0601	0.128	5.29933	40.681	4.69261	1.05984

Tabla 3.4. Tabla resumen de diseños individuales.

# Tramo	Caudal (L/s)	Longitud (m)	Pendientes lógicas
1	20	75	2
2	20	90	2
3	20	105	2
4	20	120	2
5	22	75	2
6	22	90	2
7	22	105	2
8	22	120	2
9	24	75	3
10	24	90	3
11	24	105	3
12	24	120	3
13	26	75	3
14	26	90	3
15	26	105	3
16	26	120	3
17	28	75	3
18	28	90	3
19	28	105	3
20	28	120	3

3.2. Metodología para el diseño de redes de alcantarillado

Una vez se tiene el diseño de cada uno de los tramos, con sus correspondientes pendientes lógicas, se procede a diseñar redes principales de alcantarillado, que estarán compuestas por varios tramos individuales, que formarán una línea de drenaje (entre 9 y 12 tramos, para el caso de este proyecto). Este conjunto de tramos que forman una red principal de drenaje, que de ahora en adelante se llamará "Ciudad", tendrá cierta cantidad de posibilidades que se obtienen formando todas las combinaciones posibles que se puedan obtener con todas y cada una de las pendientes lógicas de

cada tramo de la ciudad, esto quiere decir que para la construcción de los resultados se evaluarán todas las posibilidades.

$$NTA = \prod_{i=1}^n PL_i \quad (3.1)$$

donde:

NTA: Número total de alternativas [-]

n: Número total de tramos [-]

PL_i: Número de pendientes lógicas del tramo i-ésimo [-]

Al momento de diseñar una ciudad y definido la cantidad de tramos que ésta tendrá, se calcula el número total de alternativas que se obtienen de la combinación de los tramos optados (cada tramo tiene tantos diseños como pendientes lógicas hayan resultado del procedimiento inicial), por medio de la Ecuación 3.1. Una vez evaluadas todas las alternativas a través del algoritmo de poda mostrado en la Figura 3.4 se hallará la combinación de pendientes que tiene el menor costo y que cumpla la restricción de diámetro (El diámetro del tramo siguiente debe ser mayor o igual al diámetro del anterior tramo) y la restricción de profundidad máxima se cumplan (la profundidad total de todos los tramos, no debe superar la profundidad máxima permitida).

Ya que el fin principal es evaluar todas las alternativas de diseño, se diseñó una matriz por medio del algoritmo de la Figura 3.5 en la cual están contenidas todas las posibilidades. En la Tabla 3.5 se muestra un ejemplo del número total de alternativas que se obtienen al combinar 3 tramos, todas con 3 pendientes lógicas, obteniendo $3 \times 3 \times 3 = 27$ alternativas, según la Ecuación 3.1.

El proceso de montaje de la matriz requiere que en primer lugar se establezca la cantidad de tramos que contendrá la rama principal de la red de drenaje urbano. Una vez se cumple el requisito, se procede a escoger los números de los tramos (se dispone de 220 tramos para hacer la selección, en la Tabla 3.4 se muestran los primeros 20) que conformarán la rama (López Sabogal, 2012). En este trabajo, los números de los tramos se eligieron unos de manera aleatoria y otros de manera selectiva para observar cambios hidráulicos y costo-constructivos que se puedan presentar.

Tabla 3.5. Ejemplo de matriz para una ciudad de 3 tramos con 3 pendientes lógicas en cada tramo.

# de alternativa	# de pendientes lógica del tramo 1	# de pendientes lógica del tramo 2	# de pendientes lógica del tramo 3
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

3.2.1. Algoritmo de poda

En busca de la consecución del objetivo, la depuración de los diseños es el paso siguiente. Para esto, el criterio mediante el cual se realizará el filtro es la proyección vertical de la rama principal de la red, ver Ecuación 3.2. Según la normativa vigente, RAS 2000, se tiene un espacio para disponer las tuberías de 4.25 m, en el mejor de los casos (si las tuberías se encuentran ubicadas bajo zonas verdes). En el peor de los casos el espacio se reduce 45 cm, es decir se tiene 3.80 m (López



Sabogal, 2012). De esta manera, la proyección máxima permitida para este trabajo será de 3.50 m, sin tener en cuenta unos 30 cm como factor de seguridad.

$$ProyVertical(i) = L(i) * \sin(\text{atan}(S_o(i))) \quad (3.2)$$

donde

- $ProyVertical(i)$ es la proyección vertical del tramo i ,
- $L(i)$ es la longitud del tramo i
- $S_o(i)$ es la pendiente del tramo i

Para cada una de las alternativas se calcula la suma de las proyecciones verticales de los tramos con la Ecuación 3.2. Las alternativas que infrinjan con la restricción del tamaño de los diámetros (diámetros aguas abajo deben ser iguales o mayores que los diámetros aguas arriba) son descartadas. Así, las alternativas que resultan válidas son sometidas a un nuevo proceso de selección en el cual se evaluará que cumplan con una proyección menor o igual a la máxima permitida.

La Figura 3.4 muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para filtrar las alternativas. Para el ensamblaje de las redes principales sólo se tienen en cuenta aquellos diseños que cumplieron con los parámetros dispuestos en los dos procesos de depuración mencionados anteriormente.

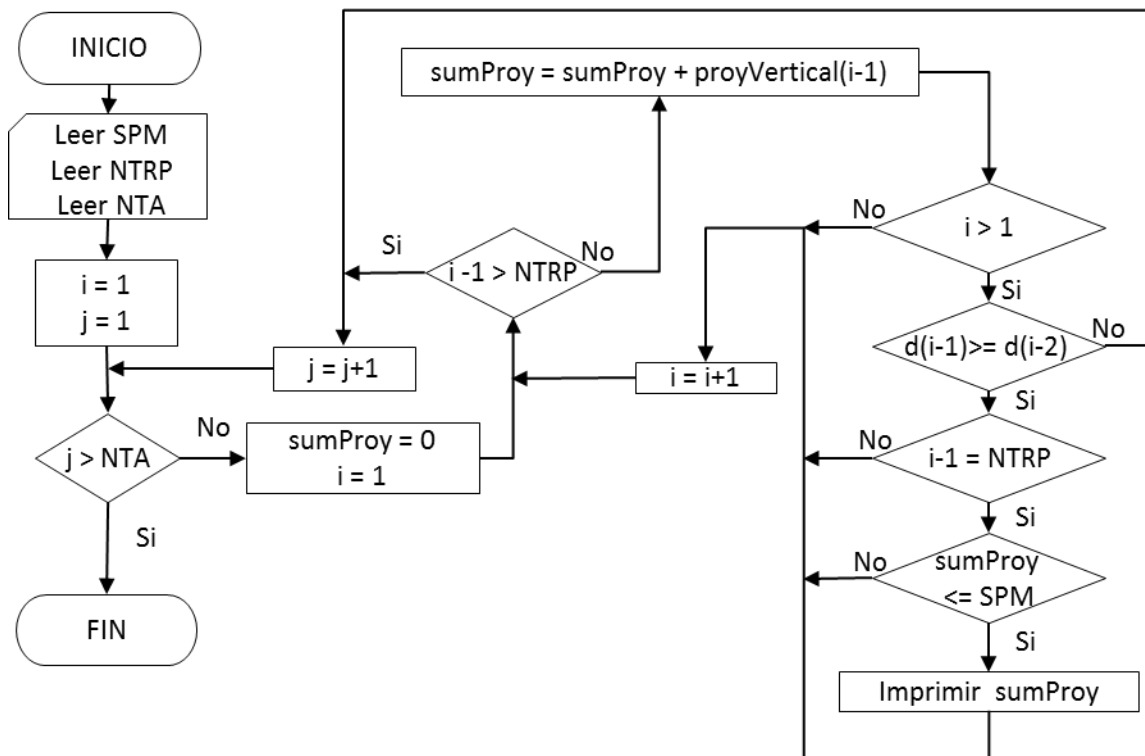


Figura 3.4. Algoritmo de poda, el cual filtra las alternativas viables. Tomado y adaptado de (López Sabogal, 2012).

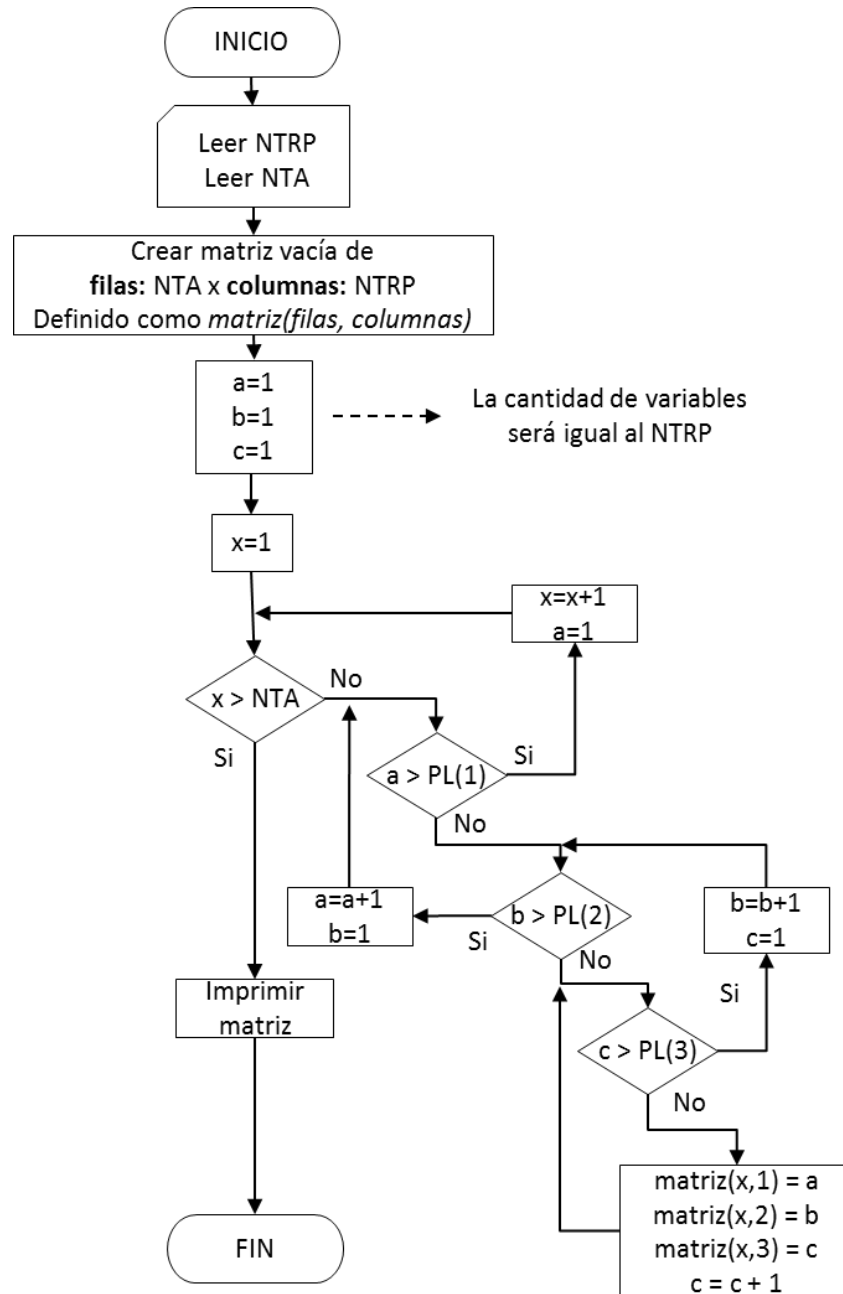


Figura 3.5. Algoritmo para la creación de la matriz de diseño.

donde:

NTA: Número total de alternativas [-]

SPM: Suma de Proyecciones Máxima [m]

NTRP: Número de Tramos de la Rama Principal [-]

PL(i): Número de pendientes lógicas del tramo i-ésimo [-]

3.3. Metodología de optimización

Después de haber aplicado el algoritmo de poda, se obtienen todas las alternativas posibles e hidráulicamente óptimas. Así, el paso final de la optimización se reduce a encontrar la alternativa menos costosa. Para realizar este paso se calculan los costos constructivos de cada uno de los tramos individualmente de cada una de las alternativas viables, por medio de la metodología que se explicará a continuación.

3.3.1. Relación costos vs. Confiabilidad

Para poder determinar la relación que existe entre los costos constructivos de una red y los criterios de confiabilidad que fueron planteados, se implementará las ecuaciones que utilizó Ivonne Navarro en el 2009. Ella utilizó tres funciones: las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5. La primera de éstas corresponde a la ecuación utilizada por (De Oro, 2008), la cual se basa en un estudio realizado por el Trenchless Technology Center de la Louisiana Tech University, por medio del cual se determinaron curvas de costos para diferentes tecnologías de rehabilitación de alcantarillados. La función que fue tomada de este estudio corresponde a la de Zanja con PVC, la cual había sido actualizada por De Oro según el IPC publicado por el DANE a febrero del 2008 (Navarro Pérez, 2009).

Las Ecuaciones 3.4 y 3.5 fueron tomadas del “Estudio de estructuración y análisis de información de inversiones de los prestadores de Acueducto y Alcantarillado”, por medio del cual la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) estructuró información relacionada con inversiones realizadas en infraestructura de acueductos y alcantarillado, y desarrolló funciones de costos para cada uno de los componentes más relevantes de estos servicios. Este estudio se basó en información proveniente de bases de datos del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), el Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) y de empresas prestadoras del servicio (Navarro Pérez, 2009).

$$C = 693.62 * d^{1.088} * H^{0.303} \quad (3.3)$$

donde

C = Costo por metro lineal de la tubería.
 d = Diámetro de la tubería en milímetros.
 H = Profundidad de instalación en metros.

$$C = 9579.31 * k * d^{0.5737} \quad (3.4)$$

donde

C = Costo por metro lineal de la tubería a mayo del 2009.
 d = Diámetro de la tubería en milímetros.
 k = Factor de conversión a pesos de diciembre del 2007 a mayo del 2009:
 $(1+IPC_{2008}) * (1+IPC_{06/2009}) = 1.32$

$$C = 1163.77 * k * V^{1.31} \quad (3.5)$$

donde

C = Costo de excavación mecánica en material común a mayo del 2009.

V = Volumen de excavación por tubería en metros cúbicos.

De esta manera, se utilizarán las dos últimas ecuaciones en conjunto para obtener un solo costo que incluye el costo del tramo de tubería, con la Ecuación 3.4 multiplicada por la longitud del tramo y el costo por excavación, donde se supone un volumen cúbico con base y altura igual a la proyección horizontal y vertical del tramo y un ancho igual al diámetro de la tubería más 1 metro para la instalación, obteniendo la Ecuación 3.6:

$$C_{Total} = (9579.31 * 1.32 * (20.54 * d)^{0.5737}) * L + 1163.77 * 1.32 * (\sin(\text{atan}(S)) * L * \cos(\text{atan}(S)) * L * ((d * 0.0254) + 1))^{1.31} \quad (3.6)$$

donde

C_{Total} = Costo total de un solo tramo.

d = Diámetro de la tubería en pulgadas.

S = Pendiente del tramo

L = Longitud del tramo.

Finalmente para entender el comportamiento de esta última ecuación, se realizaron gráficas que muestran la variación del costo respecto al cambio de diámetro de la tubería como se observa en la Figura 3.6 y respecto al cambio de pendiente como se observa en la Figura 3.7, obteniendo en conjunto una gráfica de contorno en la Figura 3.8.

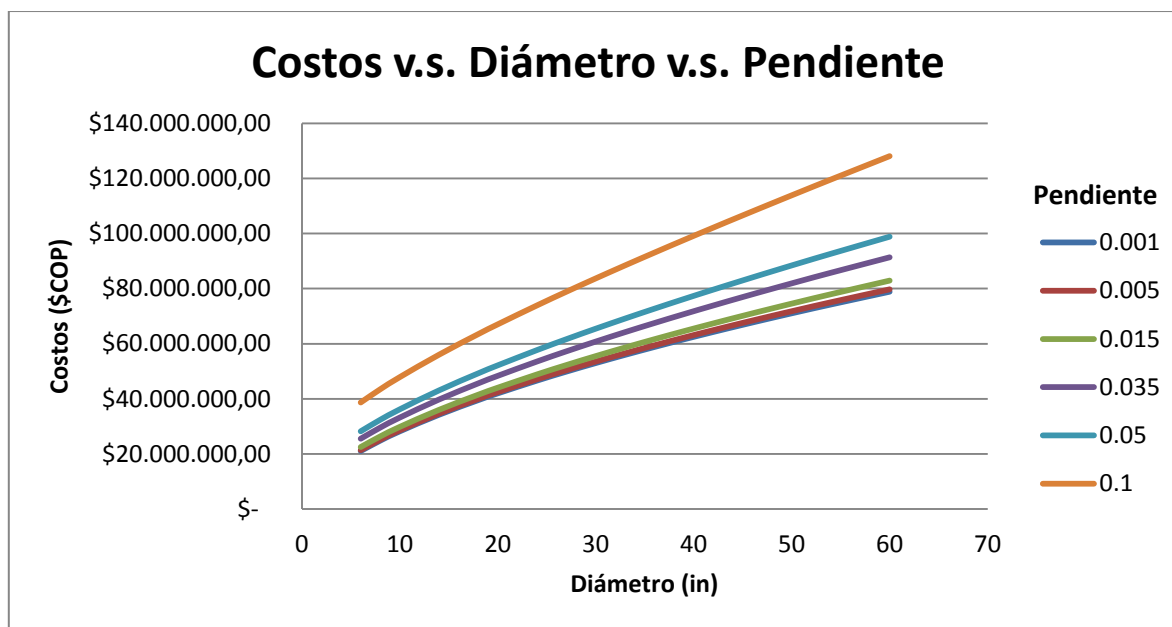


Figura 3.6. Costos constructivos en función del diámetro de la tubería.

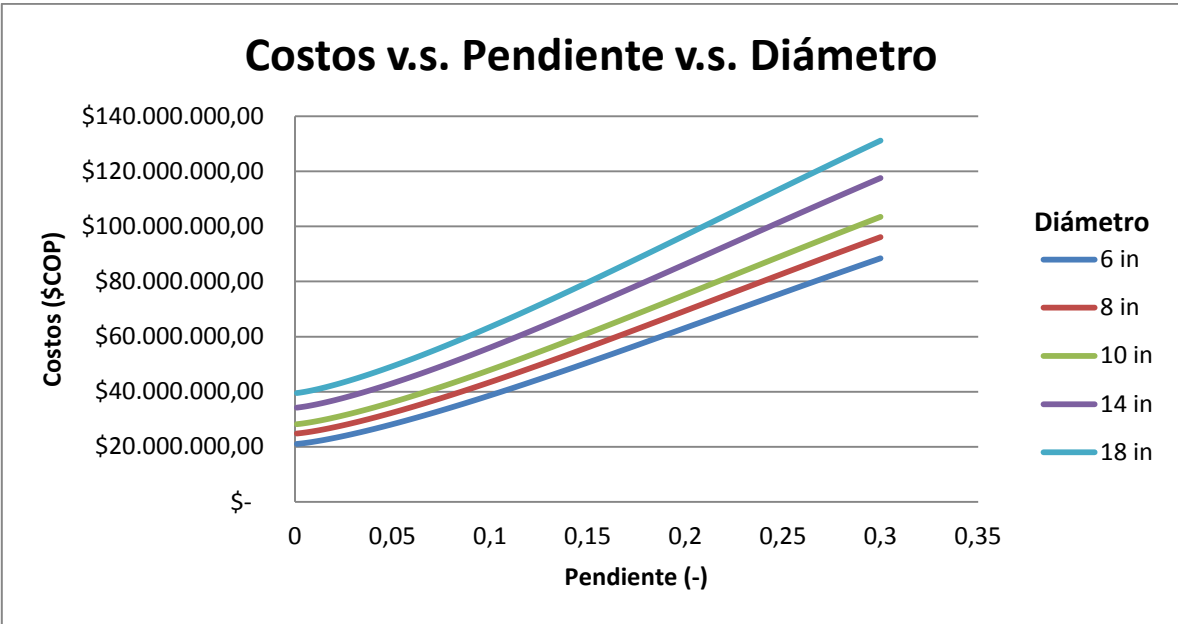


Figura 3.7. Costos constructivos en función de la pendiente de la tubería.

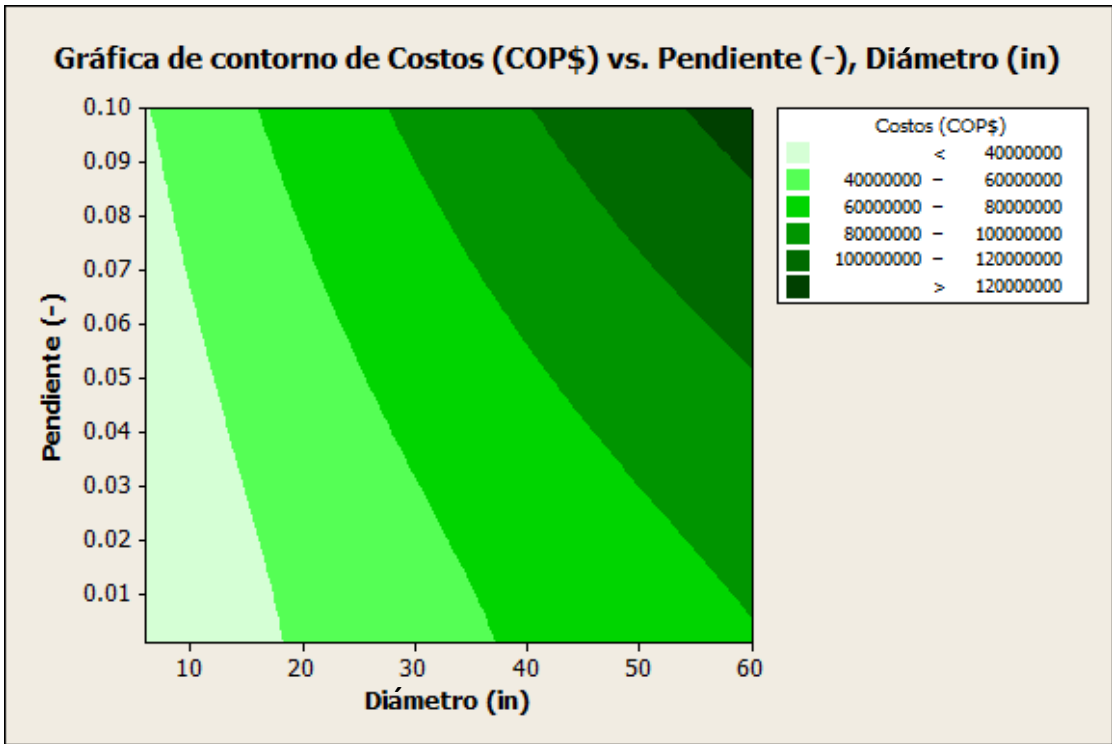


Figura 3.8. Gráfica de contorno del costo en función de la pendiente y el diámetro, utilizando el software Minitab 16®.



Dadas las anteriores gráficas, se observa que existe un cambio más fuerte en los costos debido a la variación del diámetro, en comparación con la variación de la pendiente. Provisto este resultado, la minimización del diámetro es un factor importante para disminuir los costos, demostrando así la ventaja de utilizar la pendiente lógica como parámetro de confiabilidad de la red, puesto que no solo asegura un comportamiento hidráulico óptimo; también minimiza el diámetro a utilizar.

3.3.2. Aplicación del criterio Wu a la Red de Drenaje Urbano

En las RDAP como en las redes de drenaje urbano, se implementa un diseño de tuberías en serie. Pero el diseño de tuberías en serie es un problema complejo, puesto que, en general, existen múltiples soluciones para un mismo caso. Como se observa en las metodologías de diseño mencionadas anteriormente.

Lo anterior quiere decir que existen muchas combinaciones de diámetros de la serie de tuberías que cumplirían con los requerimientos hidráulicos, los cuales consisten (para las RDAP) en llevar caudales demandados en cada nodo y el caudal demandado al final de la serie, con la potencia disponible. Por esta razón es necesario tener un criterio que permita conocer de antemano qué porcentaje de la potencia o altura total disponible debe gastarse en cada una de las tuberías en serie. El criterio utilizado debe garantizar un correcto funcionamiento hidráulico y una optimización de costos, teniendo en cuenta los costos de construcción y los de operación a largo plazo (Saldarriaga, 2007).

Un criterio que ha probado ser óptimo para el diseño de las tuberías en serie en RDAP es el de I-pai Wu (1975), originalmente desarrollado para sistemas de riego a presión. En los siguientes párrafos se explica dicho criterio y su uso en el diseño de series de tuberías. Es importante aclarar que este criterio de optimización únicamente tiene en cuenta los costos iniciales (construcción y materiales) de las tuberías (Saldarriaga, 2007).

Wu probó que en una serie de n tuberías con caudales laterales al final de cada una de ellas el costo era mínimo cuando la línea de gradiente hidráulico o línea piezométrica formaba una curva cóncava hacia arriba con una flecha de 15% en el centro con respecto a la línea recta que une las alturas totales al inicio y al final de la serie, tal como se muestra en la Figura 3.9 (Saldarriaga, 2007).

Con el objetivo de encontrar uno o varios parámetros que permitan fácilmente encontrar la solución óptima y menos costosa en el diseño de redes de drenaje urbano, en contraste con los altos costos computacionales que se requieren actualmente para encontrar dicha solución, se aplicará el criterio de Wu en el diseño de alcantarillados con el fin de observar un posible comportamiento similar al que se presenta en las RDAP.

Por esta razón, a cada alternativa óptima de cada ciudad, se graficará su línea de gradiente hidráulico, que coincide con la profundidad de la lámina de agua (y es paralela a la tubería). Esto se debe a la suposición de un flujo uniforme que fluye por una tubería parcialmente llena, como se observa en la Figura 3.10, donde se muestra una sección longitudinal vertical a lo largo de una red de drenaje urbano fluyendo parcialmente llena. Si hay un aumento en el flujo de entrada en el alcantarillado, la consecuencia será que la profundidad de flujo en la tubería se incrementará (Butler & Davies, 2011).

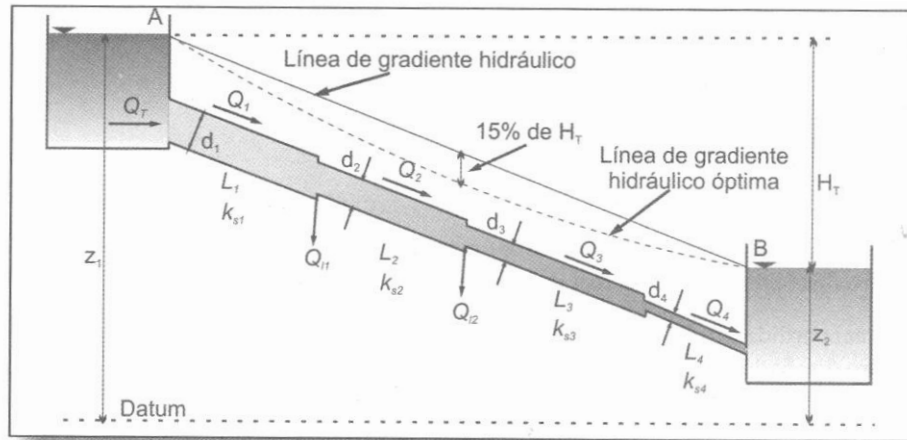


Figura 3.9. Criterio de Wu. La línea de gradiente hidráulico óptima económica en RDAP, forma una curva cóncava hacia arriba con una flecha de 15% de la altura total disponible en el centro y con respecto a la línea AB (Saldarriaga, 2007).

A esta línea de gradiente hidráulico óptimo se le hará un ajuste polinómico cuadrático para formar una curva cóncava con una flecha en el centro con respecto a la línea recta que une las alturas totales al inicio y al final de la serie, similar a la Figura 3.9. Como ejemplo, se debe mirar la Figura 7.11 en los Anexos, donde la línea verde es la línea de gradiente hidráulico, la línea azul es el ajuste y la línea roja es la línea recta que une las alturas totales al inicio y al final del ajuste.

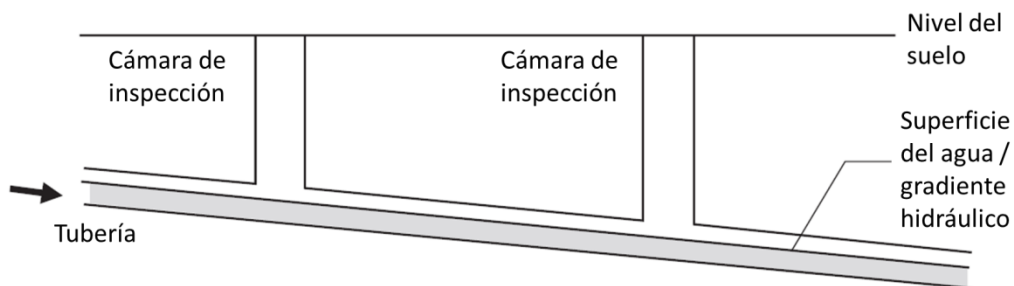


Figura 3.10. Tubería de drenaje urbano que fluye parcialmente llena. Tomado y adaptado de (Butler & Davies, 2011).

4. Resultados y Análisis

En este apartado se presentarán los resultados de cada una de las 23 ciudades (ramas principales de drenaje urbano) que se desarrollaron por medio de la metodología explicada. Para cada ciudad se mostrarán los tramos escogidos y sus correspondientes características, la estructura detallada y el perfil hidráulico de la alternativa óptima, el comportamiento de la relación entre costo constructivo y potencia unitaria, el comportamiento entre costo constructivo, potencia unitaria y la profundidad total la red y por último la relación entre costo constructivo, potencia unitaria y la cantidad de diámetros que se presentan a lo largo de la red.

4.1. Ciudad 1 de 9 tramos

Esta ciudad consta de 9 tramos con 115200 alternativas posibles. Esta cantidad se obtuvo con la Ecuación 3.1 de la página 27 como se muestra a continuación: $NTA=2*3*3*4*4*4*4*5*5$. Después se aplicó el algoritmo de poda sobre todas las posibilidades, dando como resultado 216 alternativas viables, que cumplen con la restricción de suma de proyecciones verticales menor o igual a 3.5 m y que los diámetros aguas abajo sean mayores o iguales a los diámetros agua arriba. Para llegar a este resultado, se gastaron 8.6 horas de computador. En la Tabla 4.1 se muestran las características resumidas que se escogieron para esta primera ciudad.

Tabla 4.1. Tramos escogidos para la Ciudad # 1, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
1	2	20	75
21	3	30	75
41	3	40	75
66	4	52	90
82	4	60	90
105	4	72	75
129	4	84	75
153	5	96	75
179	5	108	105
115,200		Alternativas posibles	
216		Alternativas viables	
8.6 horas		Costo Computacional	

La Figura 4.1 expone las características visuales (dando como resultado el perfil hidráulico y la localización en el espacio de las tuberías que forman la red y la respectiva demanda de cada tramo) y la Tabla 4.2 expone las características numéricas (que son los datos hidráulicos) de la alternativa óptima, la cual fue escogida por tener el costo más bajo. De la misma manera se obtienen todos los resultados, que se presentan a continuación, de todas las 23 ciudades de este proyecto.

Tabla 4.2. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 1 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
1	1	8	0.02	0.003	75	0.0045	\$ 17,784,932.44	
21	2	8	0.03	0.005	75	0.01125	\$ 17,860,489.90	
41	1	10	0.04	0.003	75	0.009	\$ 20,207,454.02	
66	2	10	0.052	0.005	90	0.0234	\$ 24,412,076.09	
82	2	10	0.06	0.006	90	0.0324	\$ 24,483,187.30	
105	2	14	0.072	0.003	75	0.0162	\$ 24,501,277.64	
129	2	14	0.084	0.004	75	0.0252	\$ 24,543,719.16	
153	3	14	0.096	0.005	75	0.036	\$ 24,589,611.49	
179	3	14	0.108	0.006	105	0.06804	\$ 34,727,113.26	
Cambios de diámetro		3					P.U. total	0.22599
						Costo total	\$ 213,109,861.30	

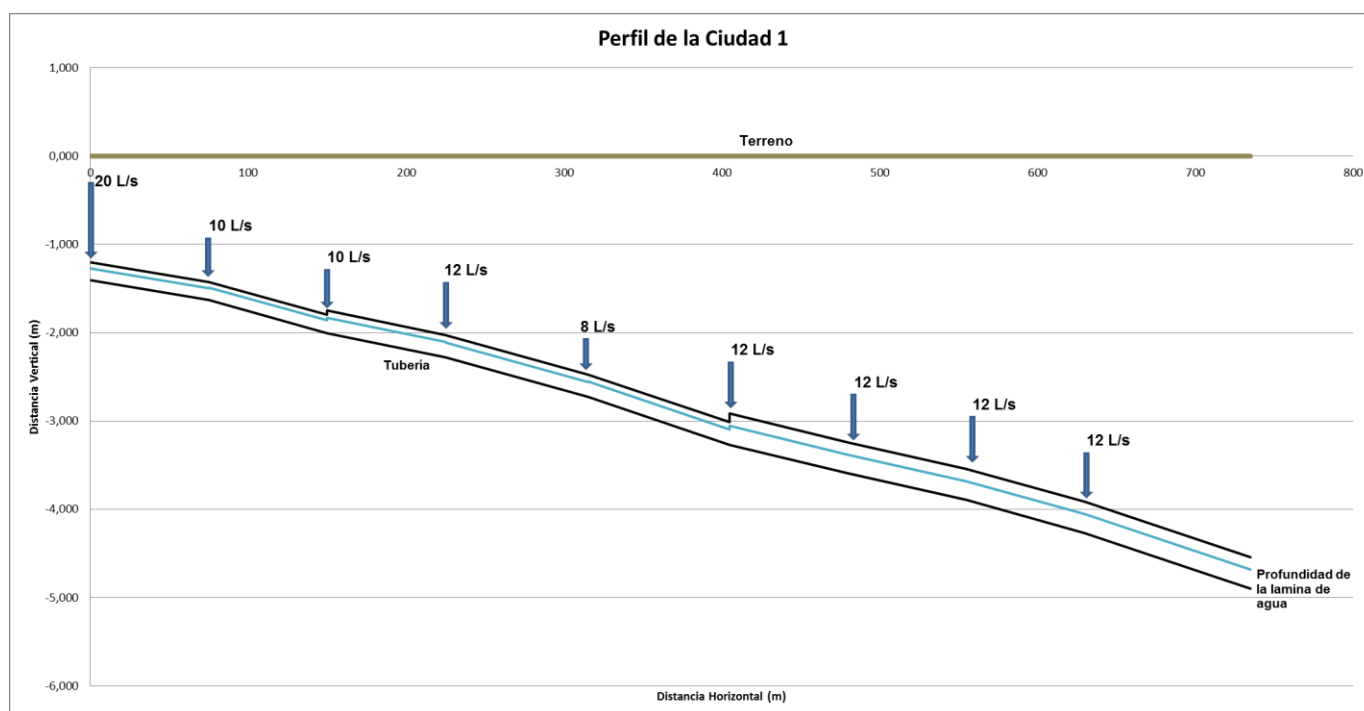


Figura 4.1. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 1.

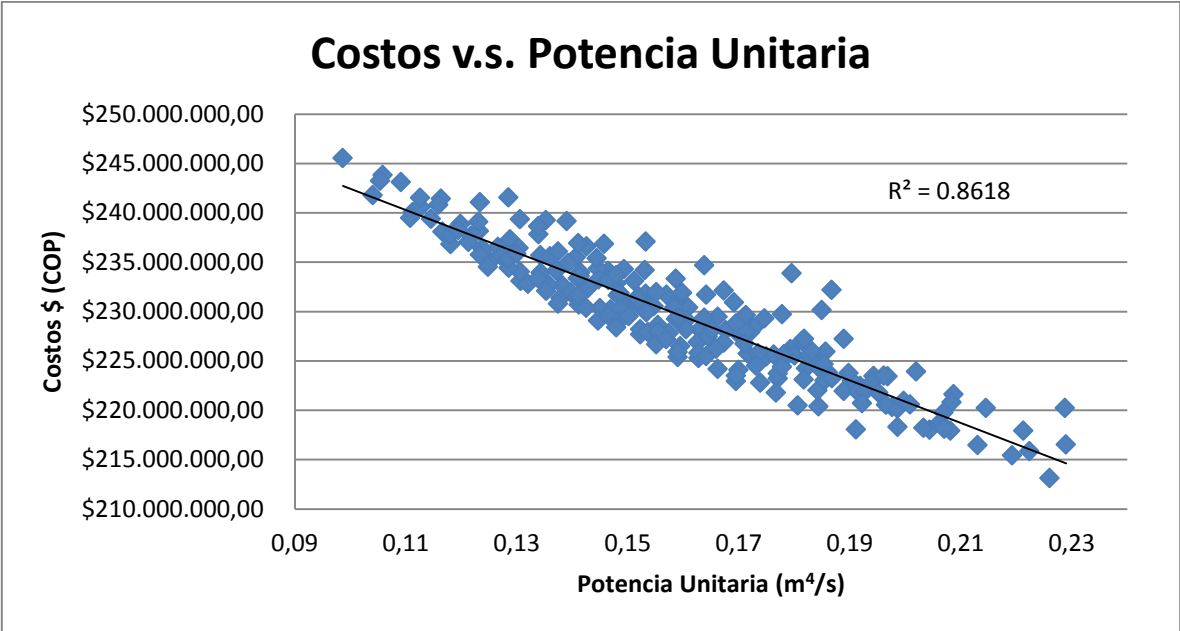


Figura 4.2. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 1.

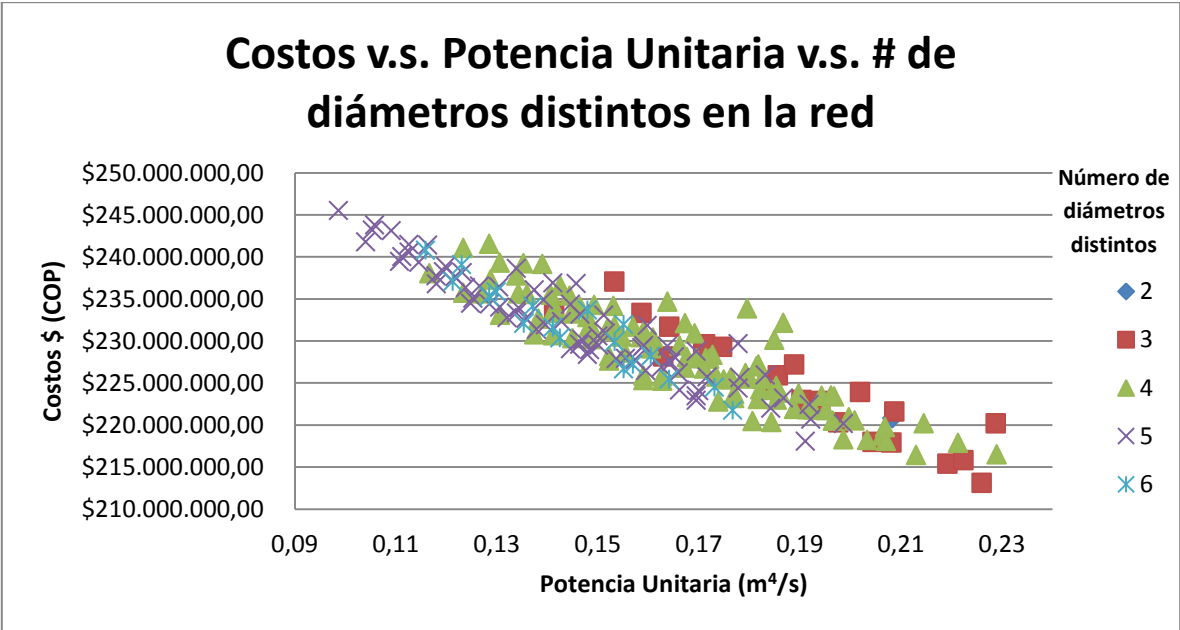


Figura 4.3. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 1.

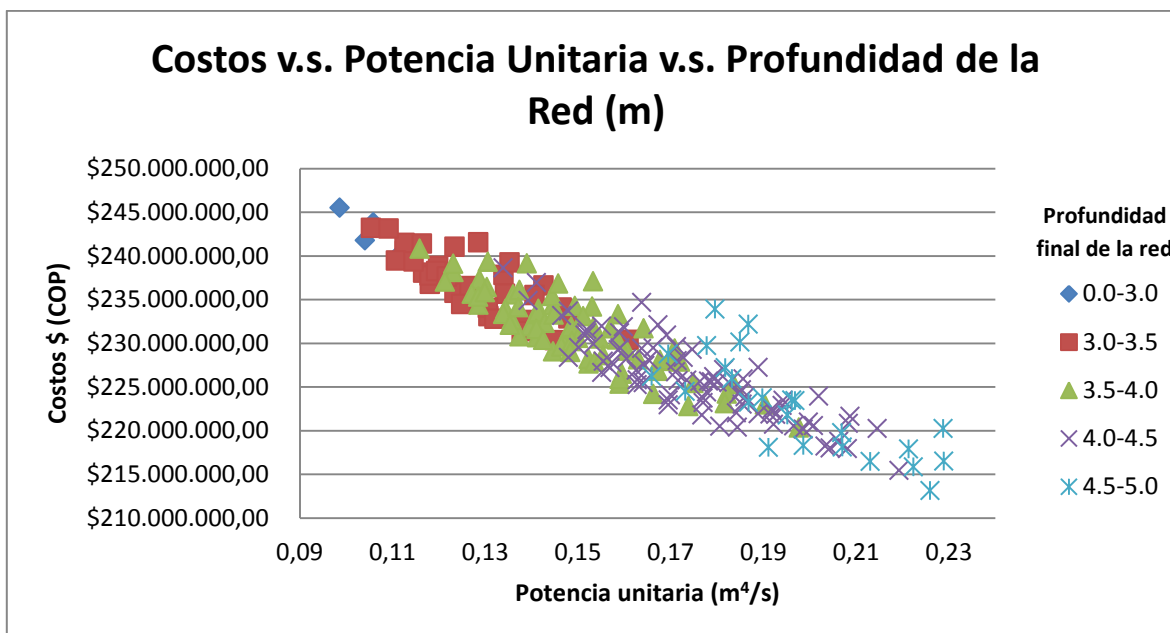


Figura 4.4. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 1.

4.2. Ciudad 2 de 11 tramos

Tabla 4.3. Tramos escogidos para la Ciudad # 2, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
12	3	24	120
36	3	36	120
52	4	44	120
64	4	50	120
82	4	60	90
109	4	74	75
125	4	82	75
147	5	92	105
176	5	106	120
192	5	114	120
211	5	124	105
5,760,000		Alternativas posibles	
46		Alternativas viables	
7.92 días		Costo Computacional	

Tabla 4.4. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 2 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
12	1	10	0.024	0.002	120	0.00576	\$ 32,366,614.37
36	1	10	0.036	0.003	120	0.01296	\$ 32,484,826.97
52	2	10	0.044	0.004	120	0.02112	\$ 32,616,126.37
64	1	14	0.05	0.002	120	0.012	\$ 39,240,459.23
82	1	14	0.06	0.002	90	0.0108	\$ 29,378,159.24
109	2	14	0.074	0.003	75	0.01665	\$ 24,501,277.64
125	2	14	0.082	0.004	75	0.0246	\$ 24,543,719.16
147	3	14	0.092	0.005	105	0.0483	\$ 34,609,173.23
176	1	20	0.106	0.002	120	0.02544	\$ 48,136,123.31
192	1	20	0.114	0.003	120	0.04104	\$ 48,286,645.23
211	1	20	0.124	0.003	105	0.03906	\$ 42,188,641.14
Cambios de diámetro		3			P.U. total	0.25773	
						Costo total	\$ 388,351,765.87

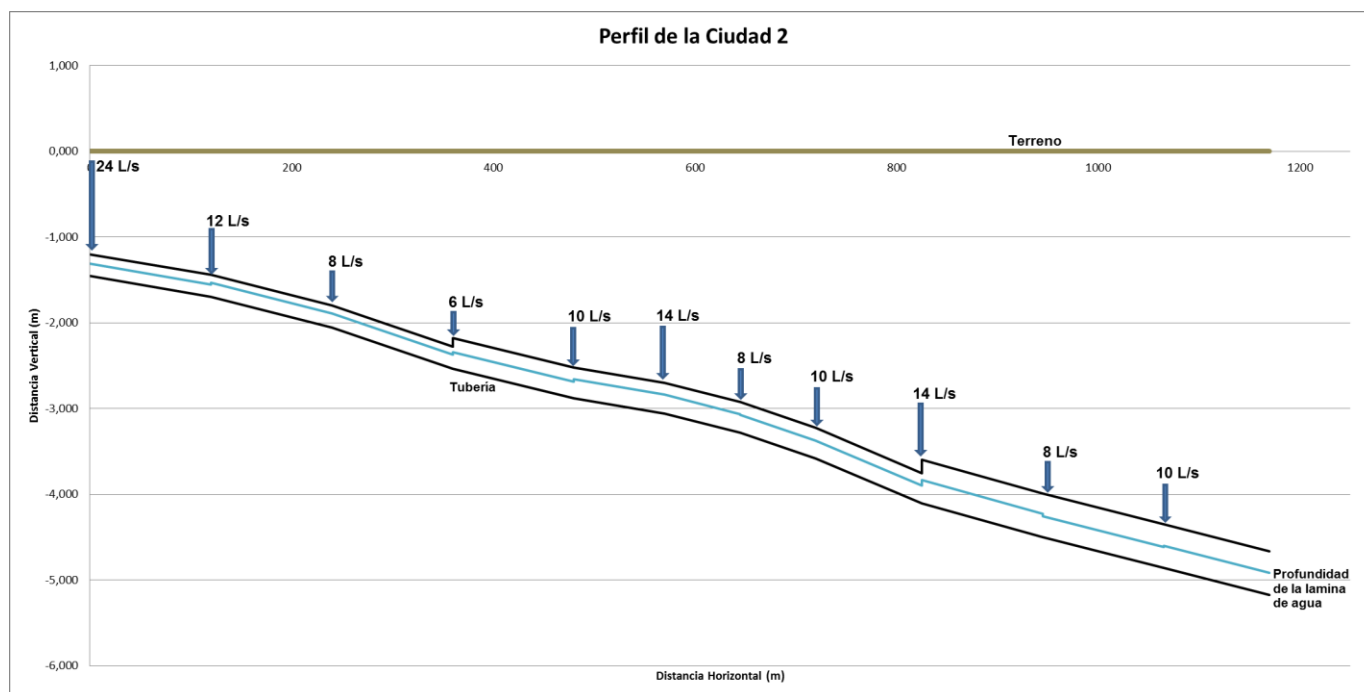


Figura 4.5. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 2.

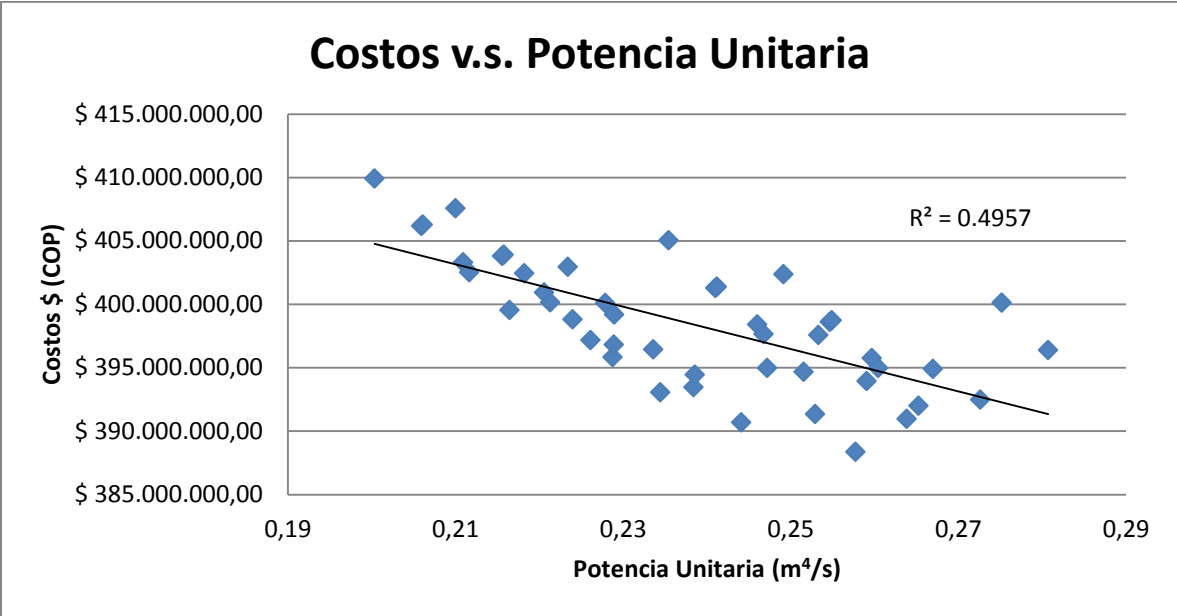


Figura 4.6. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 2.

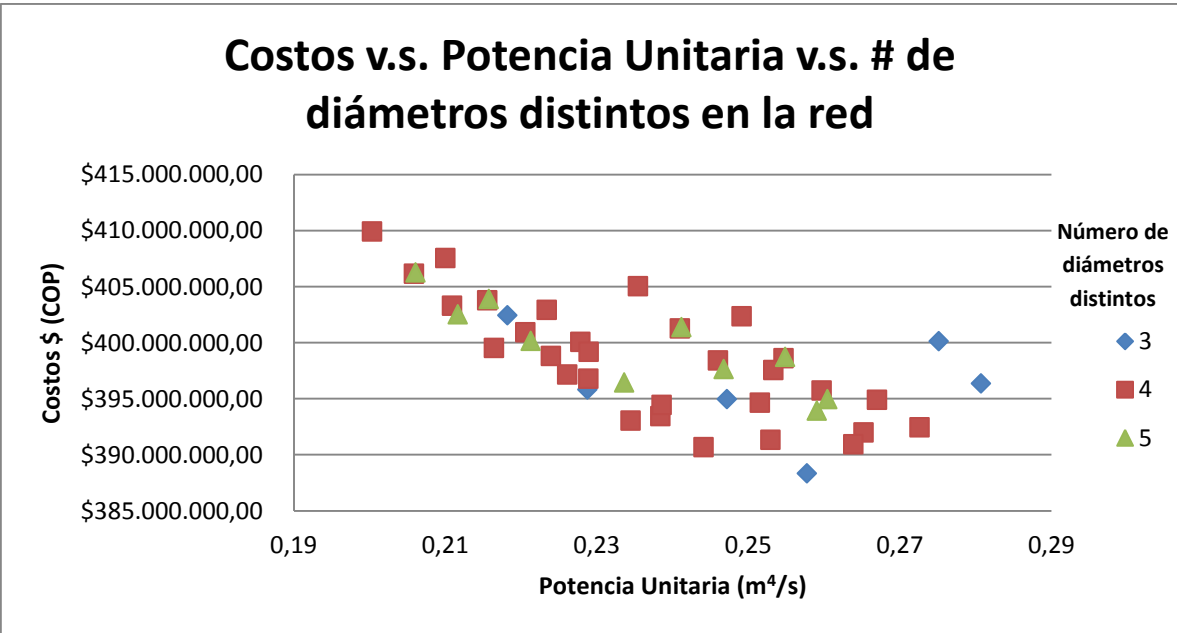


Figura 4.7. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 2.

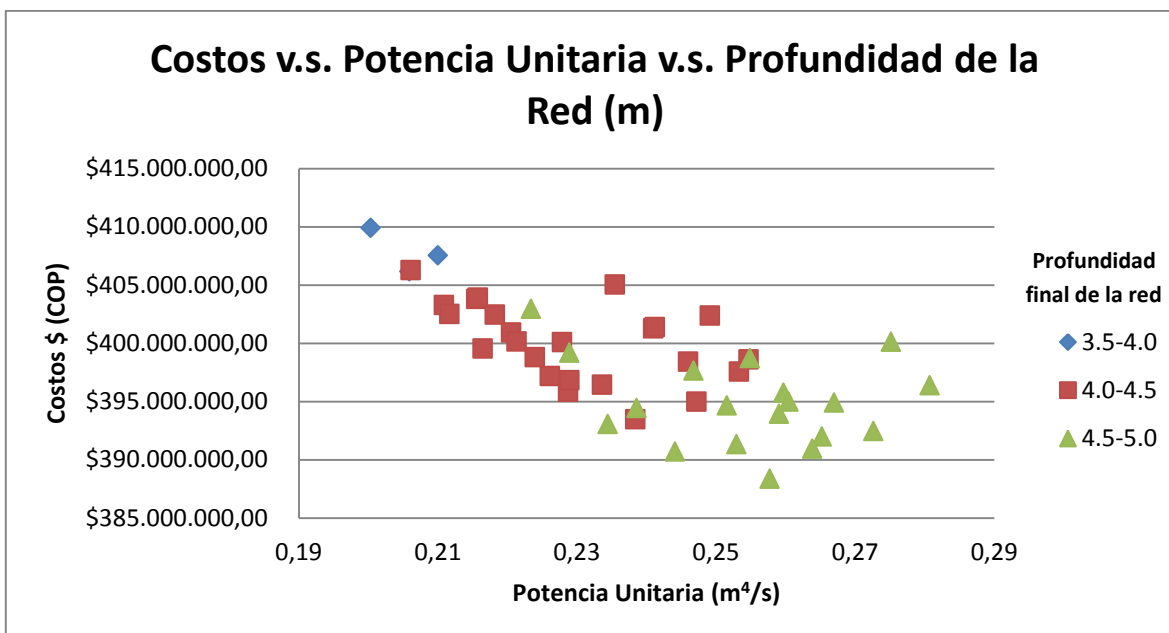


Figura 4.8. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 2.

4.3. Ciudad 3 de 9 tramos

Tabla 4.5. Tramos escogidos para la Ciudad # 3, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
19	3	28	105
39	3	38	35
56	4	46	120
72	4	54	120
95	5	66	90
112	4	74	120
139	5	88	105
148	5	92	120
170	5	104	90
360,000		Alternativas posibles	
124		Alternativas viables	
18.2 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.6. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 3 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
19	1	10	0.028	0.002	105	0.00588	\$ 28,292,080.28	
39	1	10	0.038	0.003	105	0.01197	\$ 28,375,395.60	
56	2	10	0.046	0.004	120	0.02208	\$ 32,616,126.37	
72	1	14	0.054	0.002	120	0.01296	\$ 39,240,459.23	
95	2	14	0.066	0.003	105	0.02079	\$ 34,395,877.28	
112	2	14	0.074	0.003	120	0.02664	\$ 39,371,373.30	
139	3	14	0.088	0.004	105	0.03696	\$ 34,498,359.00	
148	3	14	0.092	0.005	120	0.0552	\$ 39,674,009.95	
170	3	14	0.104	0.006	90	0.05616	\$ 29,660,944.07	
Cambios de diámetro		2					P.U. total	0.24864
							Costo total	\$ 306,124,625.08

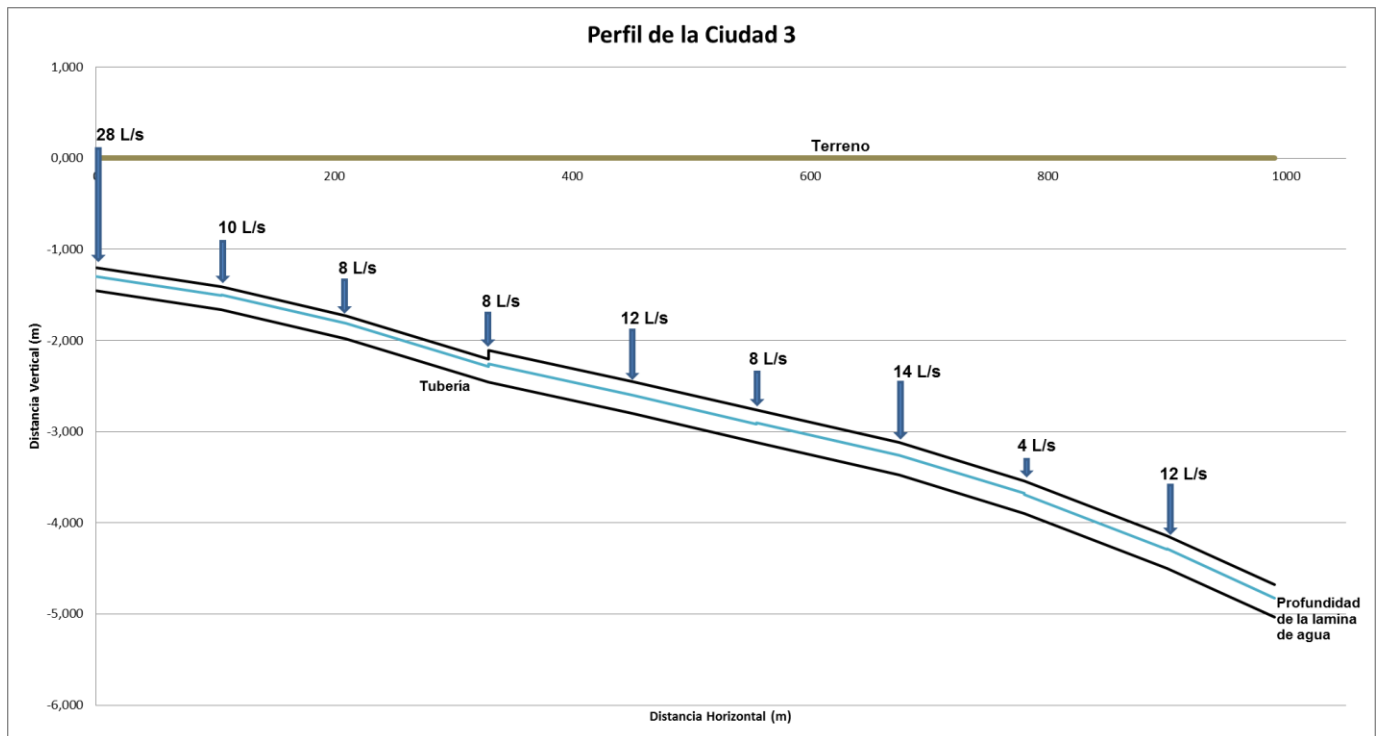


Figura 4.9. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 3.

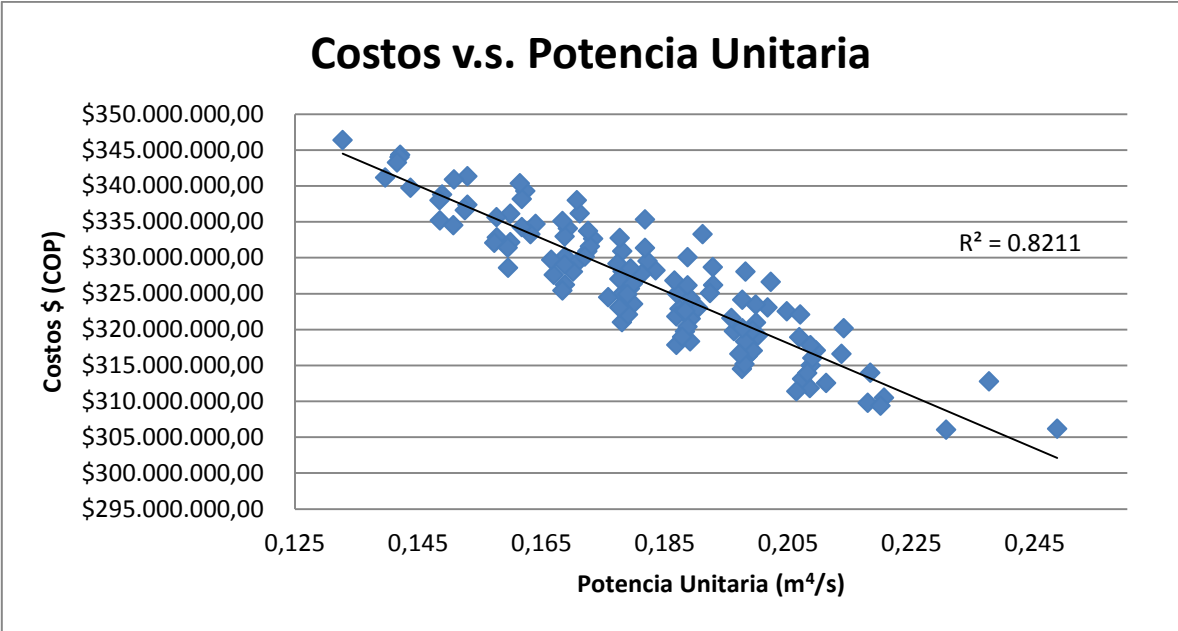


Figura 4.10. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 3.

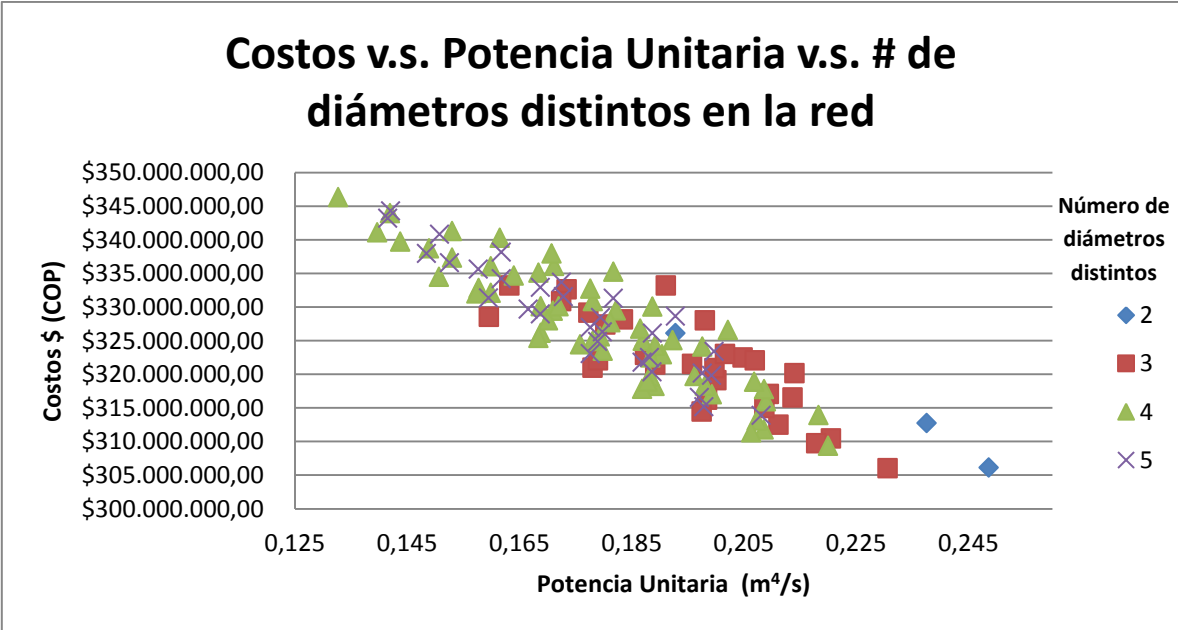


Figura 4.11. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 3.

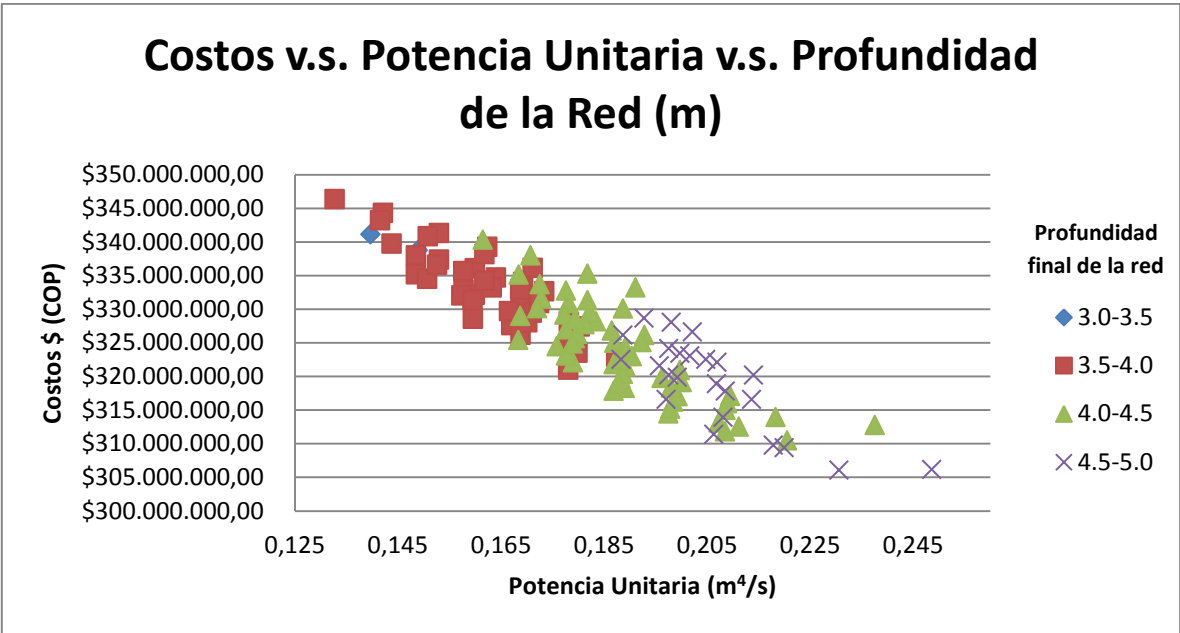


Figura 4.12. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 3.

4.4. Ciudad 4 de 10 tramos

Tabla 4.7. Tramos escogidos para la Ciudad # 4, y sus características.

Table with 4 columns: # Tramo, # Total de pendientes lógicas, Caudal (L/s), Longitud (m). It lists 10 specific tramos and summary statistics for 900,000 alternatives, 121 viable alternatives, and a 1.32-day computational cost.

Tabla 4.8. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 4 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
8	1	8	0.022	0.003	120	0.00792	\$ 28,600,729.65	
33	1	10	0.036	0.003	75	0.0081	\$ 20,207,454.02	
41	1	10	0.04	0.003	75	0.009	\$ 20,207,454.02	
69	2	10	0.054	0.005	75	0.02025	\$ 20,287,217.59	
95	2	14	0.066	0.003	105	0.02079	\$ 34,395,877.28	
105	2	14	0.072	0.003	75	0.0162	\$ 24,501,277.64	
135	3	14	0.086	0.004	105	0.03612	\$ 34,498,359.00	
151	3	14	0.094	0.005	105	0.04935	\$ 34,609,173.23	
172	2	18	0.104	0.003	120	0.03744	\$ 45,459,793.74	
198	2	18	0.118	0.004	90	0.04248	\$ 34,072,494.84	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.24765	
						Costo total	\$ 296,839,831.01	

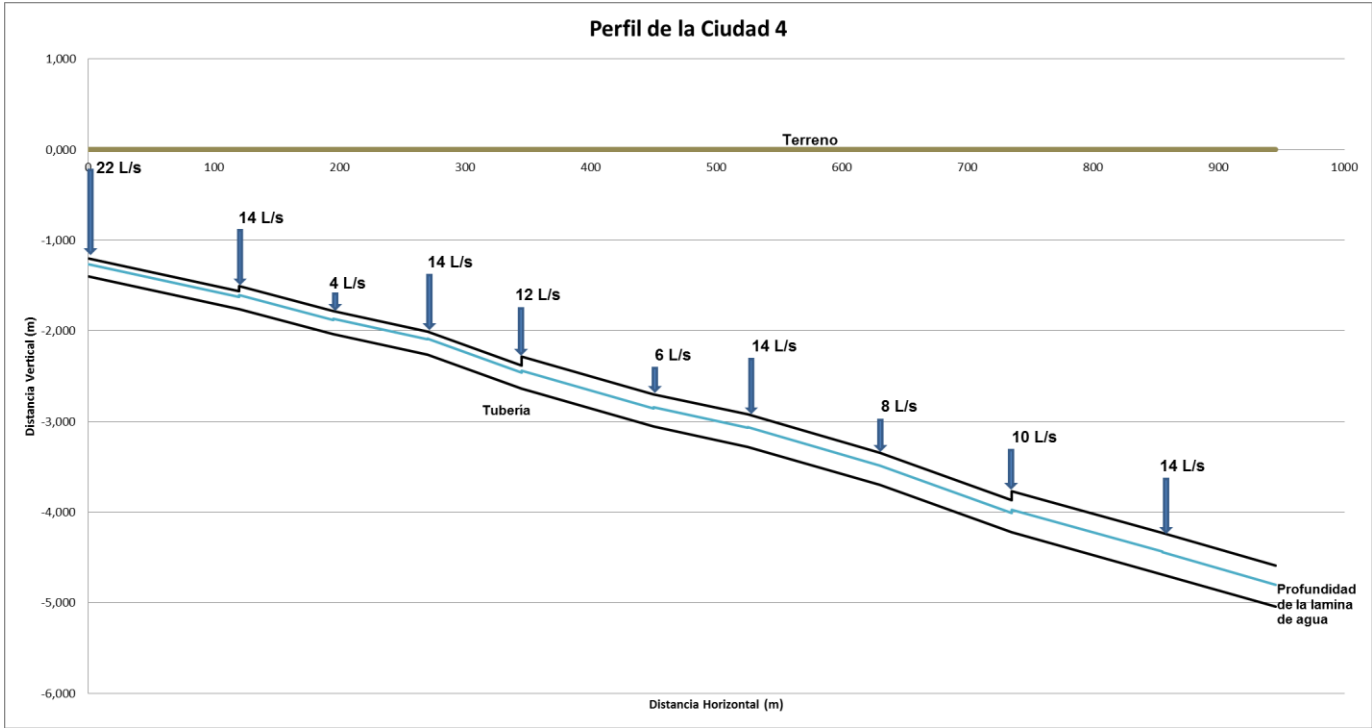


Figura 4.13. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 4.

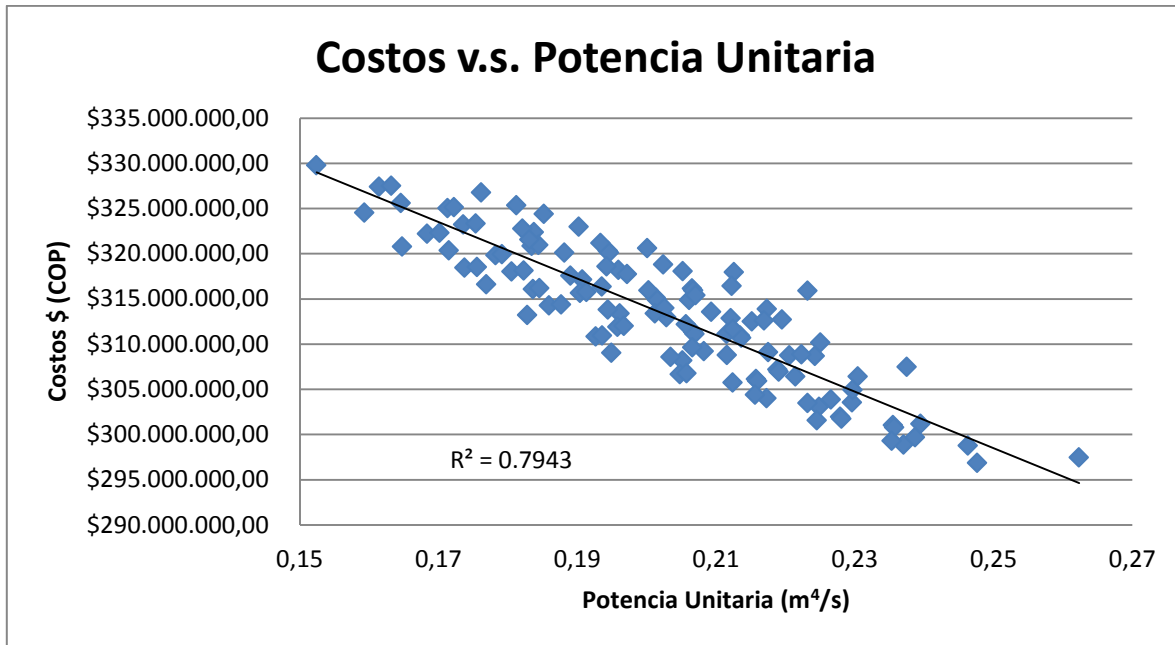


Figura 4.14. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 4.

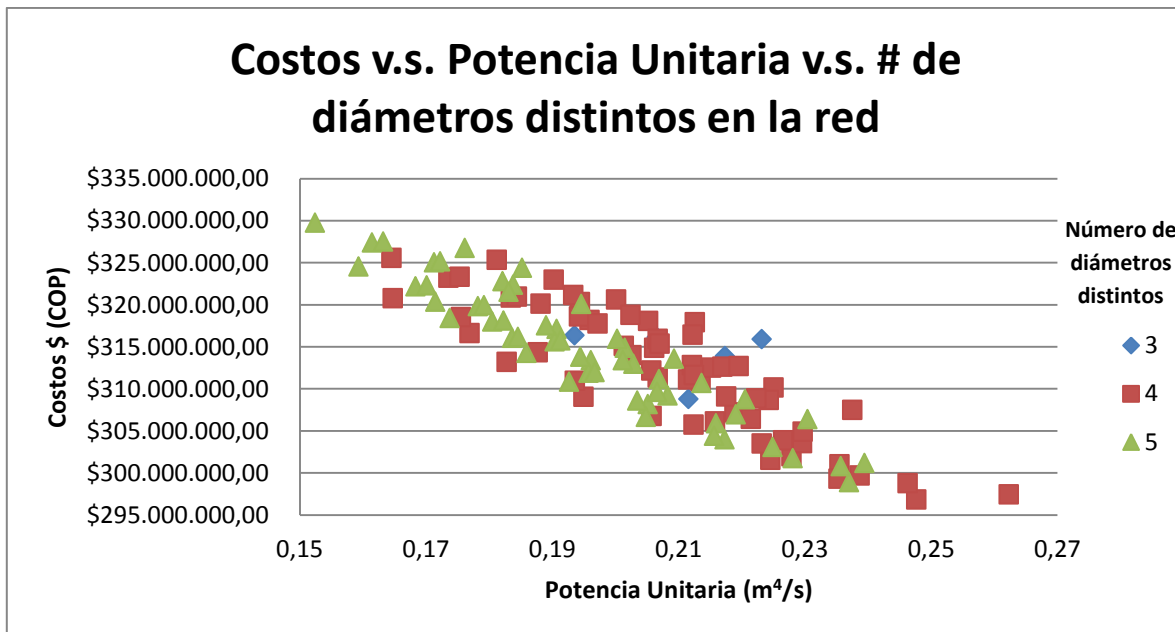


Figura 4.15. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 4.

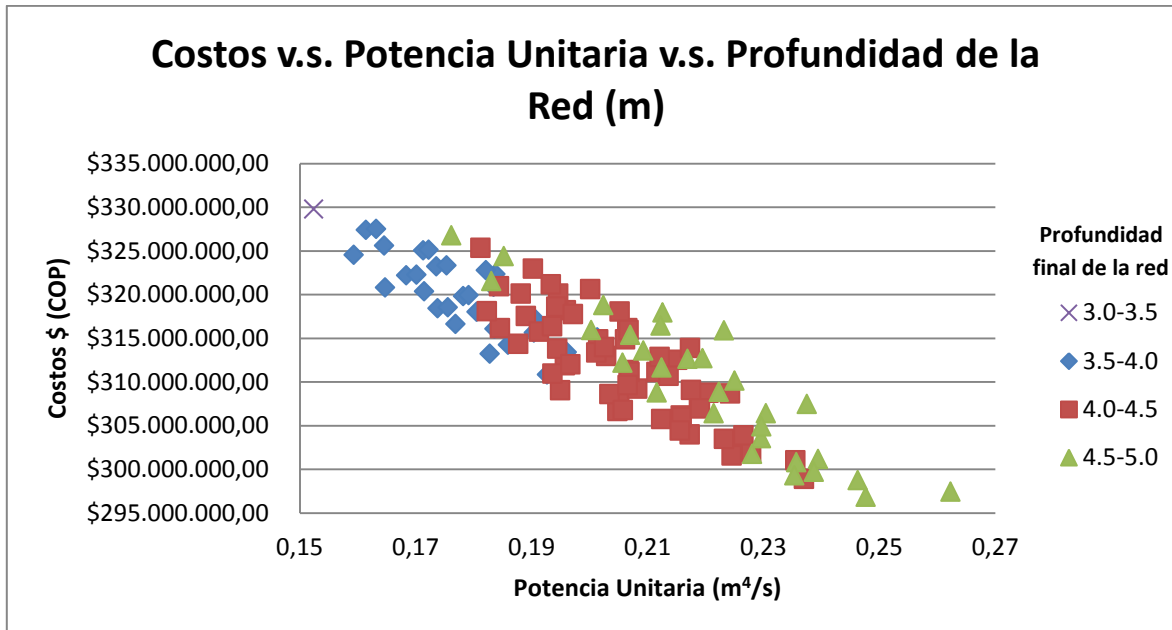


Figura 4.16. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 4.

4.5. Ciudad 5 de 10 tramos

Tabla 4.9. Tramos escogidos para la Ciudad # 5, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
48	3	42	120
84	4	60	120
132	4	84	120
164	5	100	120
204	5	120	120
208	5	122	120
212	5	124	120
216	5	126	120
220	5	128	120
1,500,000		Alternativas posibles	
2		Alternativas viables	
1.07 días		Costo Computacional	

Tabla 4.10. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 5 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65
48	1	10	0.042	0.004	120	0.02016	\$ 32,616,126.37
84	1	14	0.06	0.002	120	0.0144	\$ 39,240,459.23
132	1	18	0.084	0.002	120	0.02016	\$ 45,315,879.40
164	2	18	0.1	0.003	120	0.036	\$ 45,459,793.74
204	1	20	0.12	0.003	120	0.0432	\$ 48,286,645.23
208	1	20	0.122	0.003	120	0.04392	\$ 48,286,645.23
212	1	20	0.124	0.003	120	0.04464	\$ 48,286,645.23
216	1	20	0.126	0.003	120	0.04536	\$ 48,286,645.23
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23
Cambios de diámetro		5			P.U. total	0.32112	
						Costo total	\$ 432,666,214.52

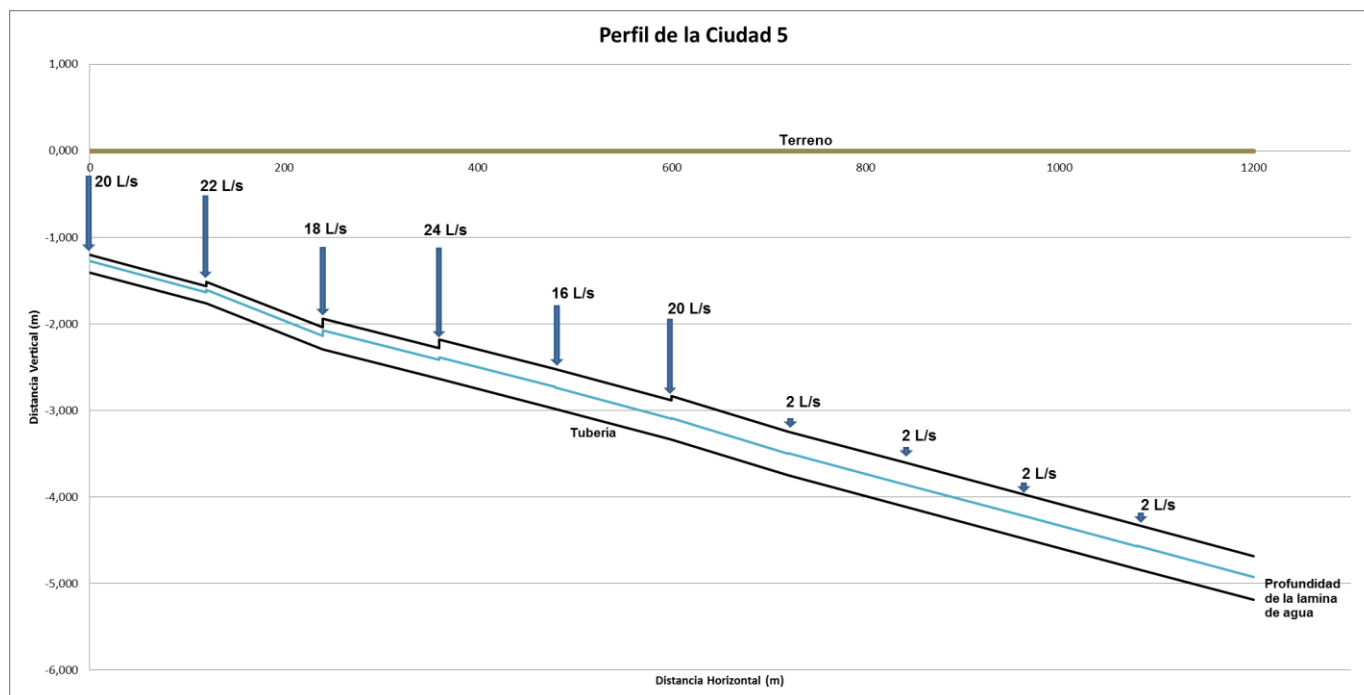


Figura 4.17. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 5.

Como esta ciudad solo presenta 2 posibilidades, no es posible obtener las gráficas de las diferentes relaciones de potencia unitaria que se han venido presentado a lo largo de este trabajo.

4.6. Ciudad 6 de 10 tramos

Tabla 4.11. Tramos escogidos para la Ciudad # 6, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
8	2	22	120
12	3	24	120
16	3	26	120
20	3	28	120
60	4	48	120
100	5	68	120
140	5	88	120
180	5	108	120
220	5	128	120
270,000		Alternativas posibles	
33		Alternativas viables	
15.6 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.12. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 6 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
8	1	8	0.022	0.003	120	0.00792	\$ 28,600,729.65	
12	1	10	0.024	0.002	120	0.00576	\$ 32,366,614.37	
16	1	10	0.026	0.002	120	0.00624	\$ 32,366,614.37	
20	1	10	0.028	0.002	120	0.00672	\$ 32,366,614.37	
60	2	10	0.048	0.004	120	0.02304	\$ 32,616,126.37	
100	2	14	0.068	0.003	120	0.02448	\$ 39,371,373.30	
140	3	14	0.088	0.004	120	0.04224	\$ 39,516,780.31	
180	1	20	0.108	0.002	120	0.02592	\$ 48,136,123.31	
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.1956	
						Costo total	\$ 362,228,350.90	

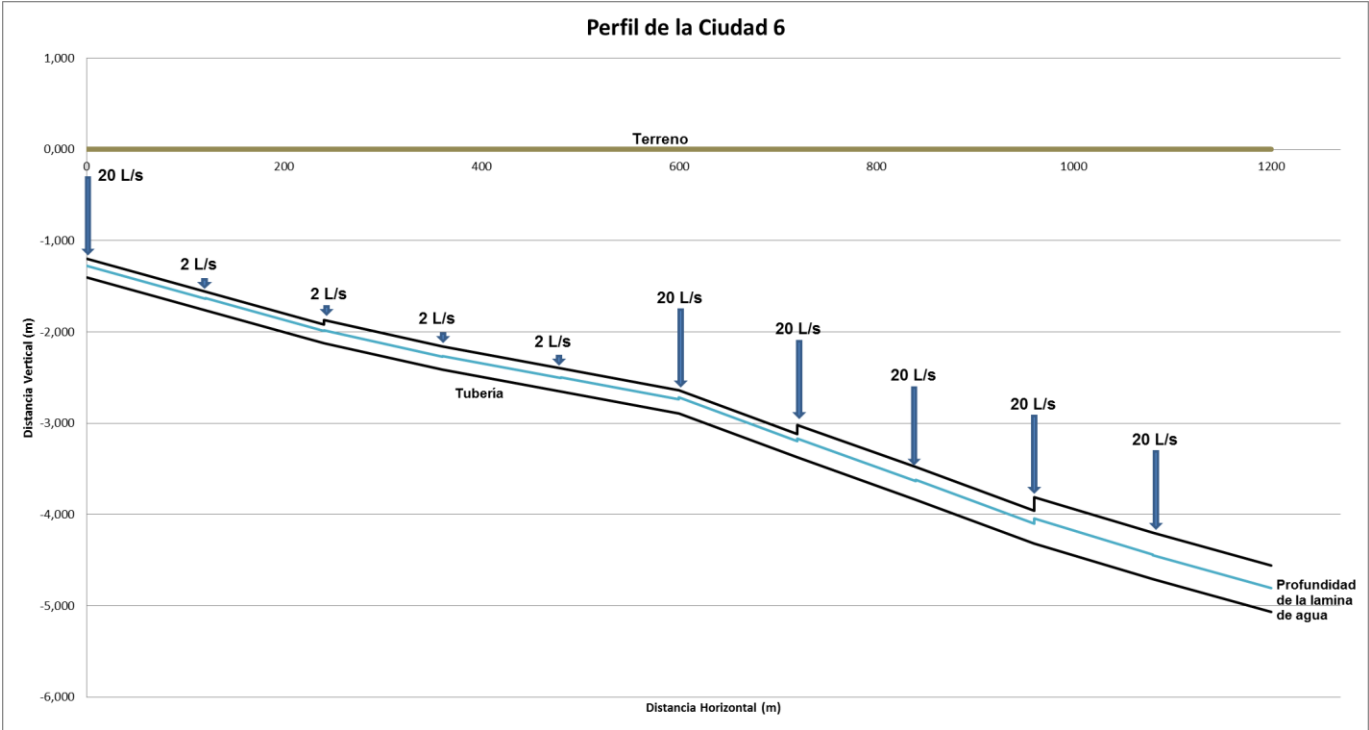


Figura 4.18. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 6.

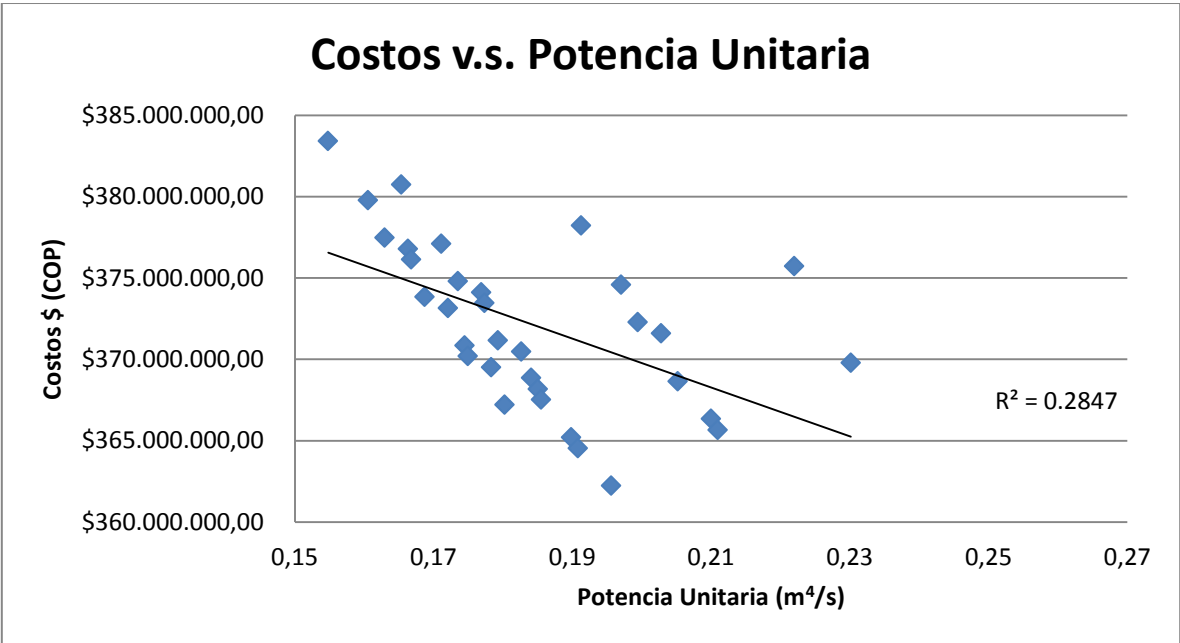


Figura 4.19. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 6.

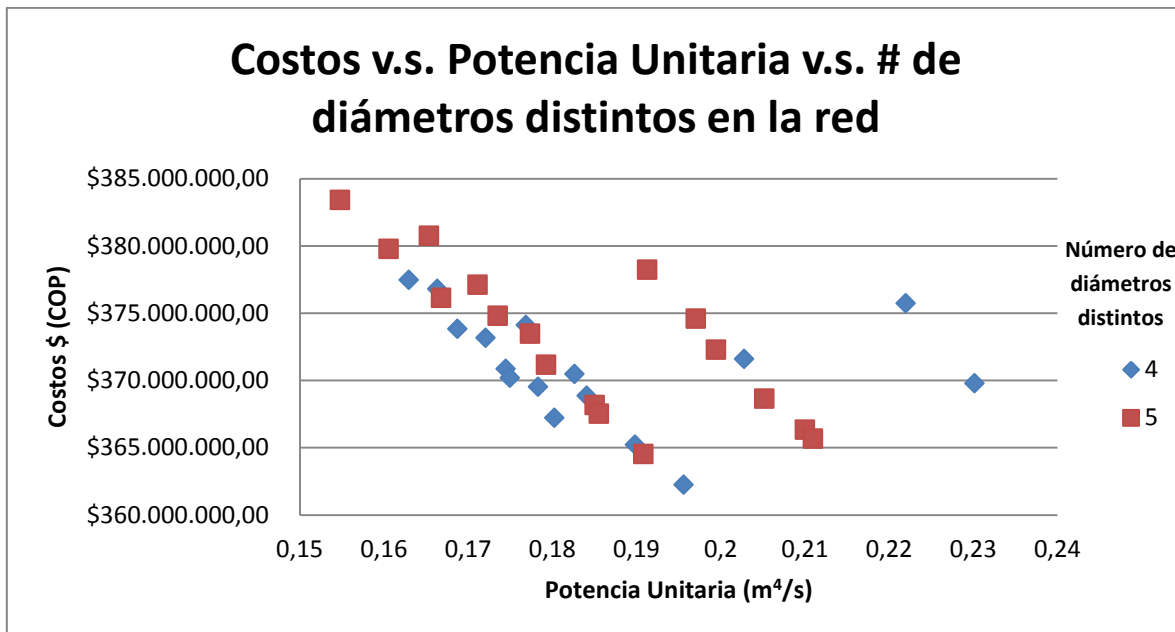


Figura 4.20. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 6.

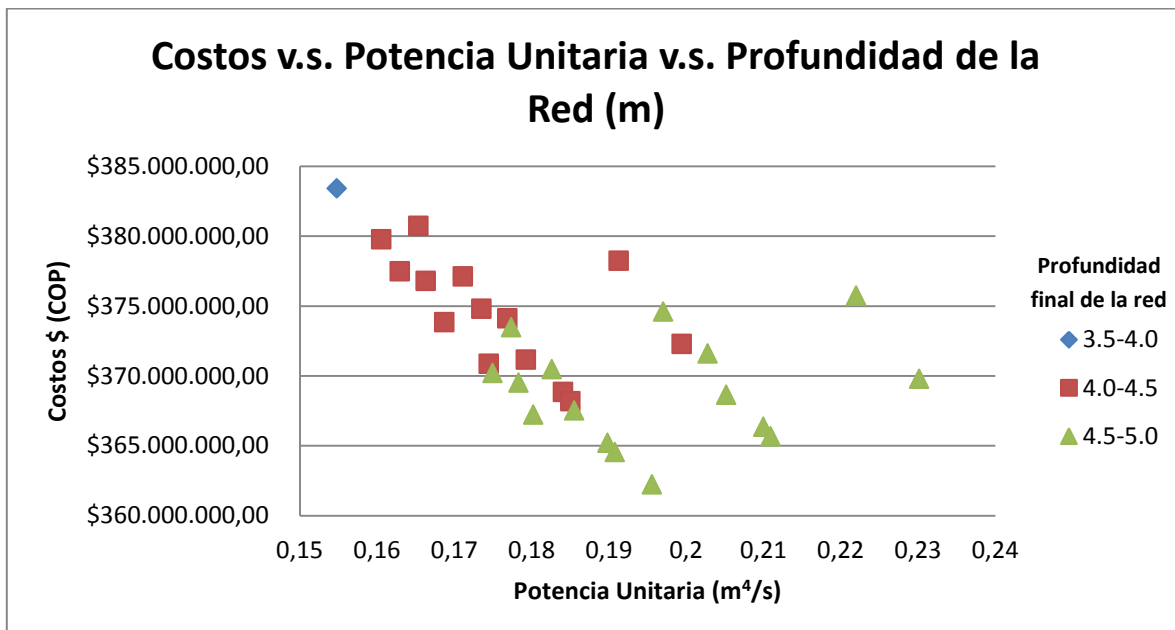


Figura 4.21. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 6.

4.7. Ciudad 7 de 9 tramos

Tabla 4.13. Tramos escogidos para la Ciudad # 7, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
8	2	22	120
12	3	24	120
72	4	54	120
76	4	56	120
80	4	58	120
140	5	88	120
144	5	90	120
148	5	92	120
96,000		Alternativas posibles	
47		Alternativas viables	
3.74 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.14. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 7 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
8	1	8	0.022	0.003	120	0.00792	\$ 28,600,729.65	
12	2	8	0.024	0.004	120	0.01152	\$ 28,725,105.34	
72	1	14	0.054	0.002	120	0.01296	\$ 39,240,459.23	
76	1	14	0.056	0.002	120	0.01344	\$ 39,240,459.23	
80	1	14	0.0579	0.002	120	0.01392	\$ 39,240,459.23	
140	3	14	0.088	0.004	120	0.04224	\$ 39,516,780.31	
144	3	14	0.09	0.004	120	0.0432	\$ 39,516,780.31	
148	3	14	0.092	0.005	120	0.0552	\$ 39,674,009.95	
Cambios de diámetro		2				P.U. total	0.2076	
						Costo total	\$ 322,355,512.89	

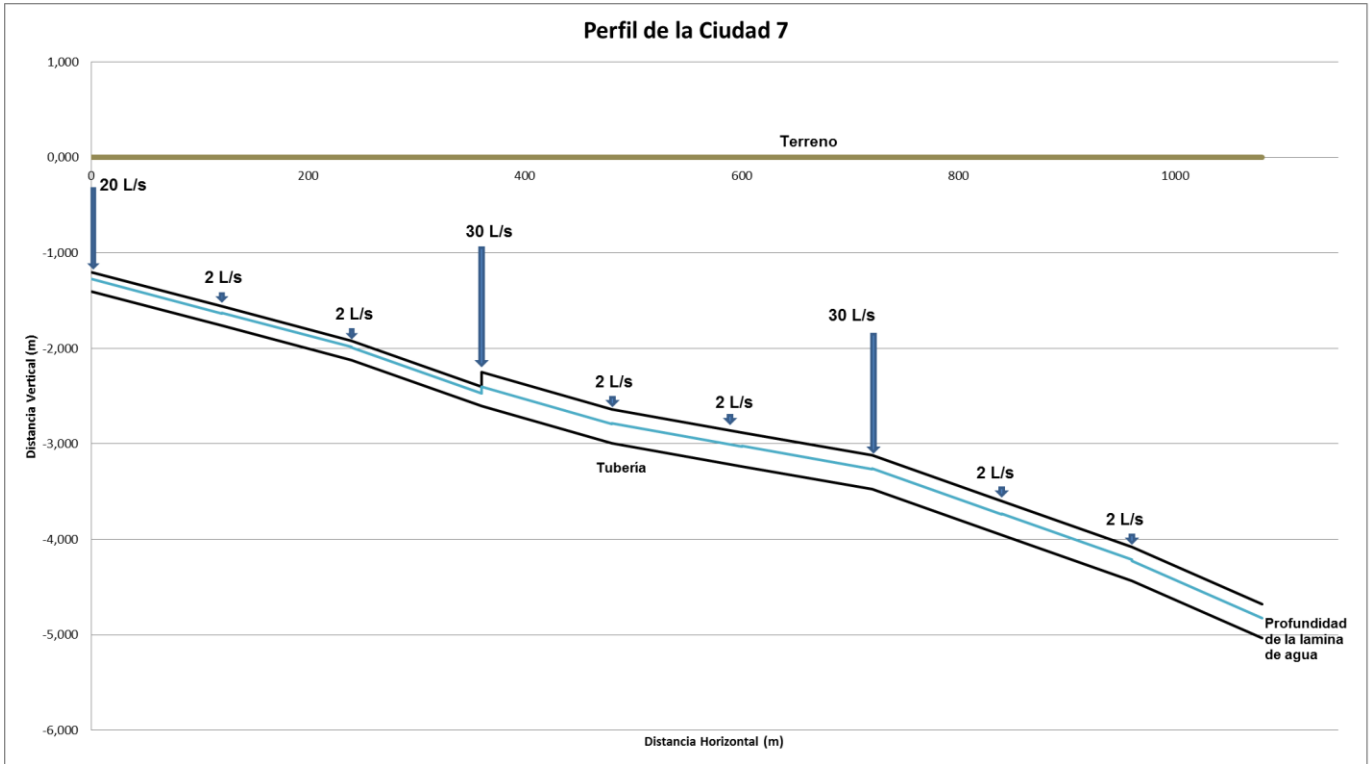


Figura 4.22. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 7.

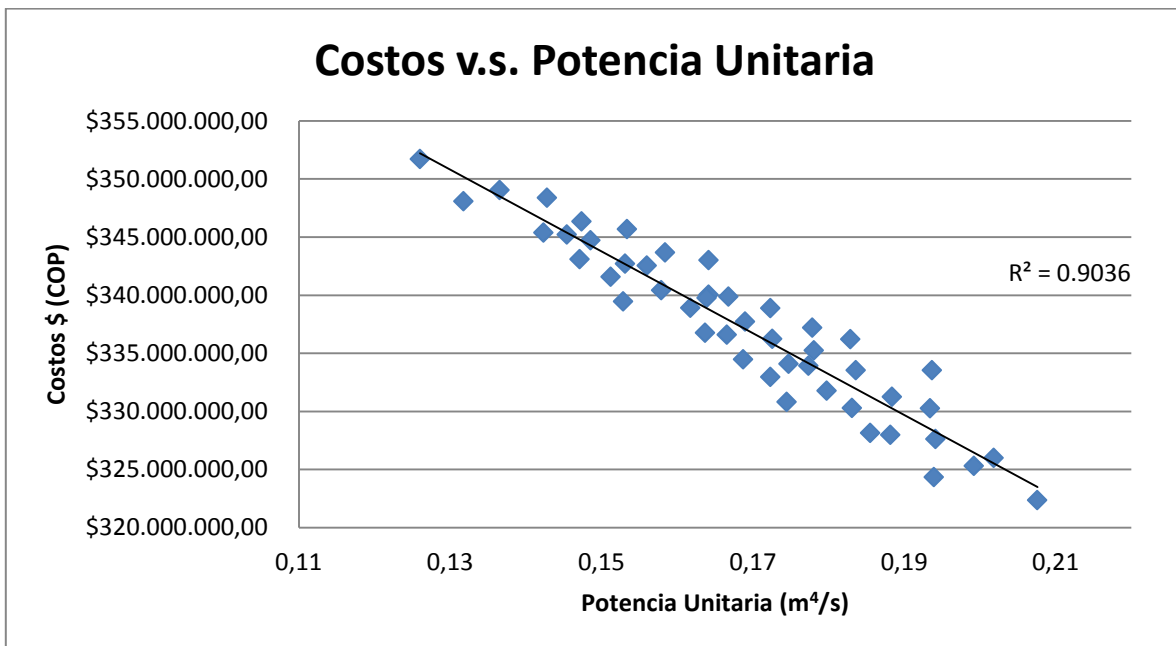


Figura 4.23. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 7.

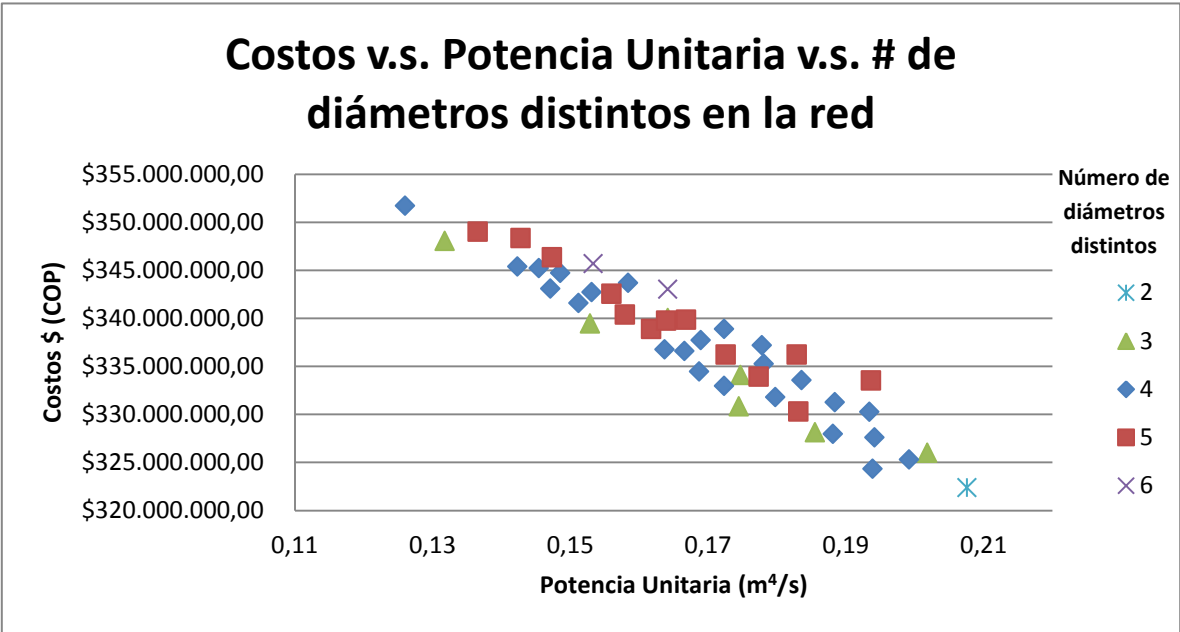


Figura 4.24. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 7.

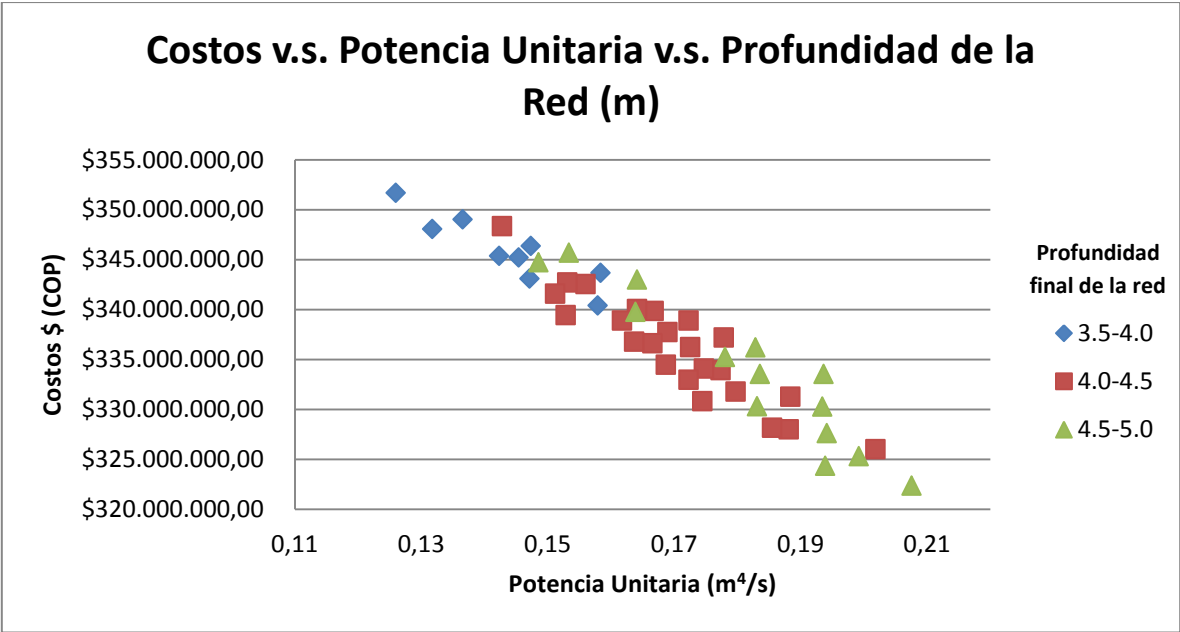


Figura 4.25. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 7.

4.8. Ciudad 8 de 9 tramos

Tabla 4.15. Tramos escogidos para la Ciudad # 8, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
44	3	40	120
48	3	42	120
52	4	44	120
56	4	46	120
60	4	48	120
64	4	50	120
108	4	72	120
144	5	90	120
92,160		Alternativas posibles	
22		Alternativas viables	
1.33 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.16. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 8 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
44	1	10	0.04	0.003	120	0.0144	\$ 32,484,826.97	
48	1	10	0.042	0.004	120	0.02016	\$ 32,616,126.37	
52	2	10	0.044	0.004	120	0.02112	\$ 32,616,126.37	
56	2	10	0.046	0.004	120	0.02208	\$ 32,616,126.37	
60	1	14	0.048	0.002	120	0.01152	\$ 39,240,459.23	
64	1	14	0.05	0.002	120	0.012	\$ 39,240,459.23	
108	2	14	0.072	0.003	120	0.02592	\$ 39,371,373.30	
144	3	14	0.09	0.004	120	0.0432	\$ 39,516,780.31	
Cambios de diámetro		3				P.U. total	0.1776	
						Costo total	\$ 316,303,007.78	

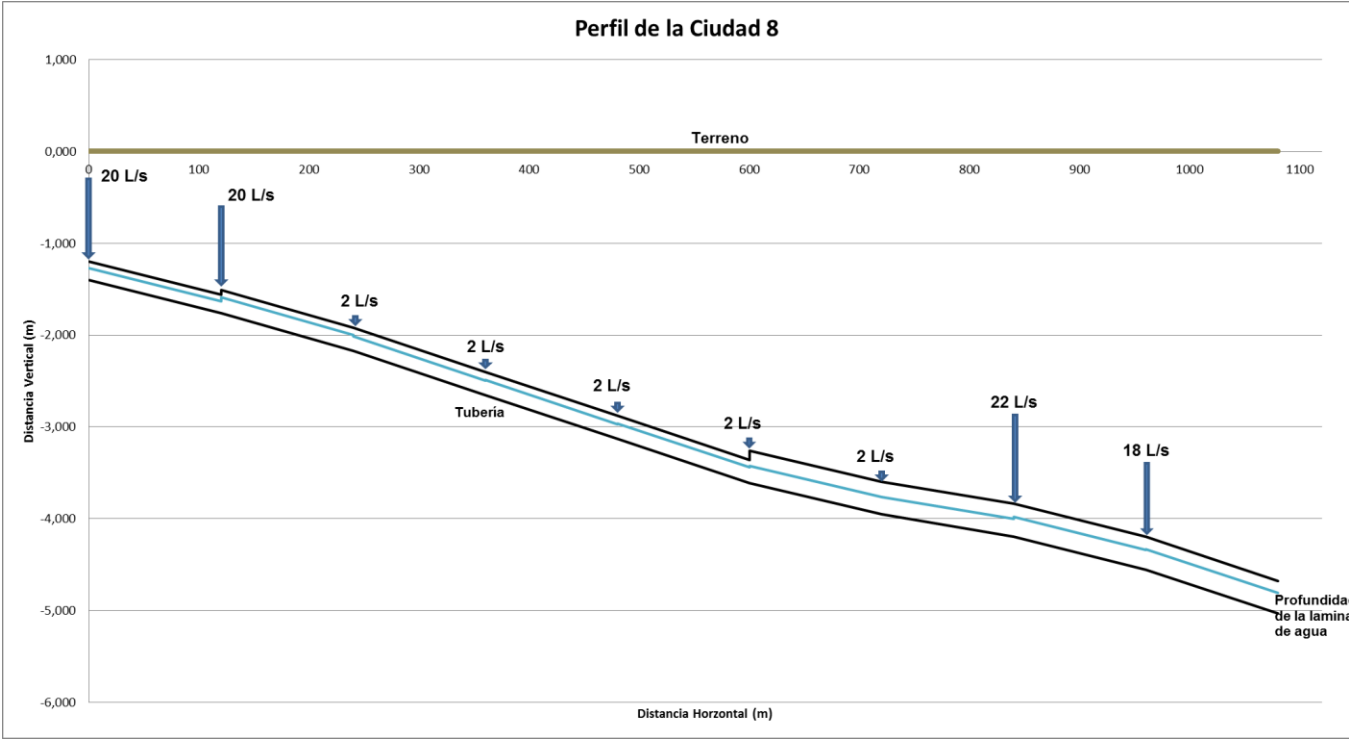


Figura 4.26. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 8.

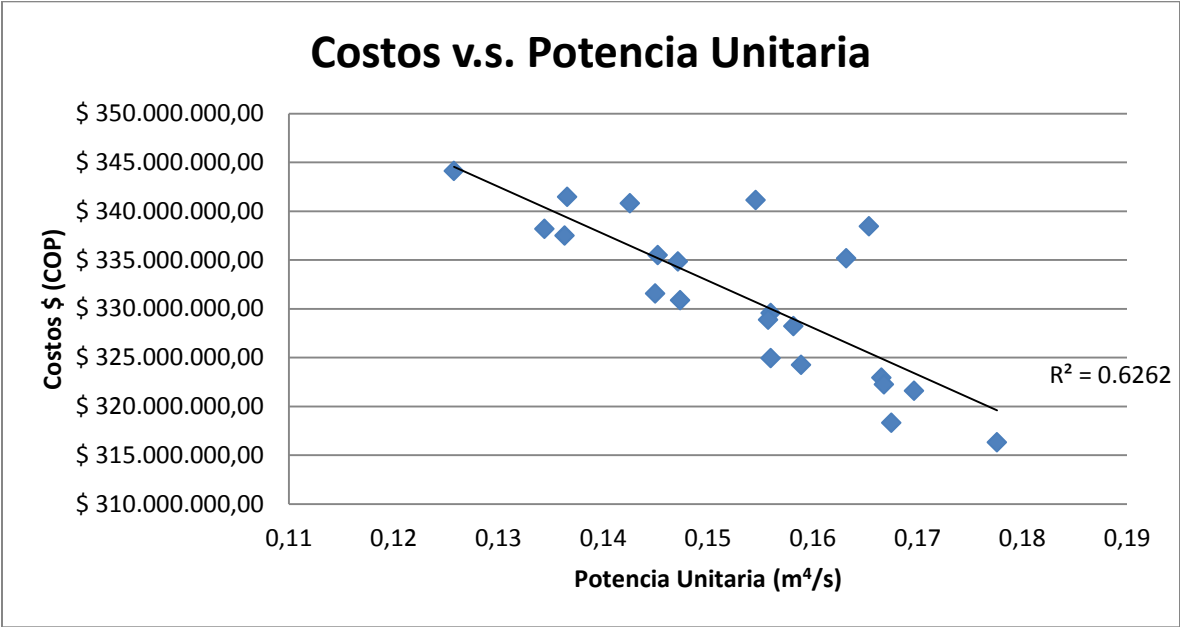


Figura 4.27. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 8.

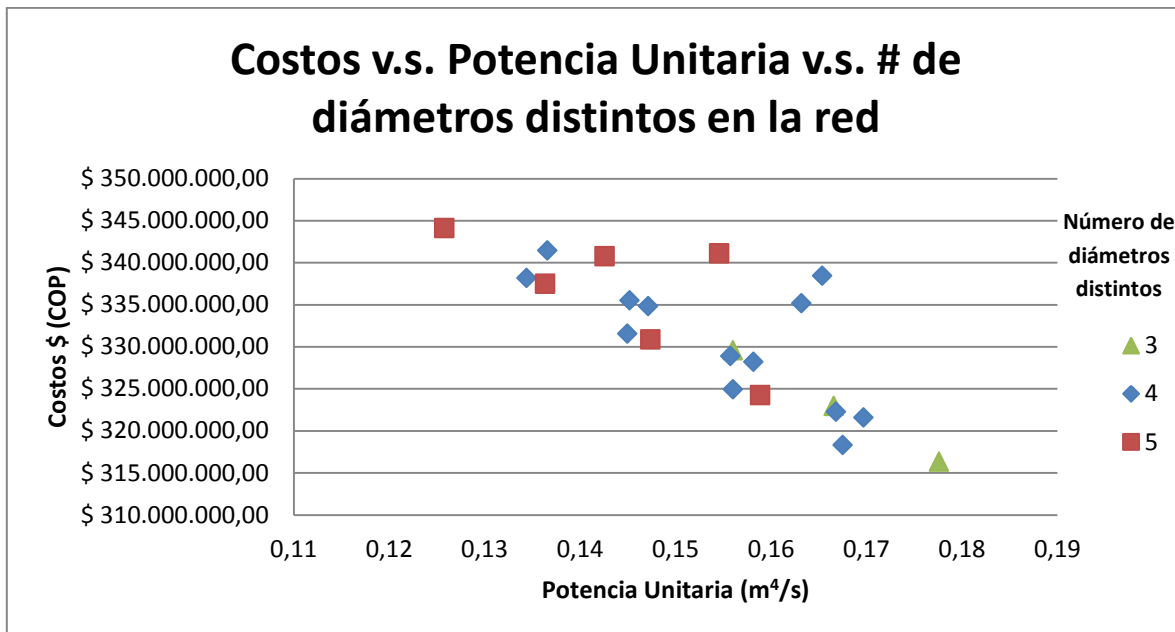


Figura 4.28. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 8.

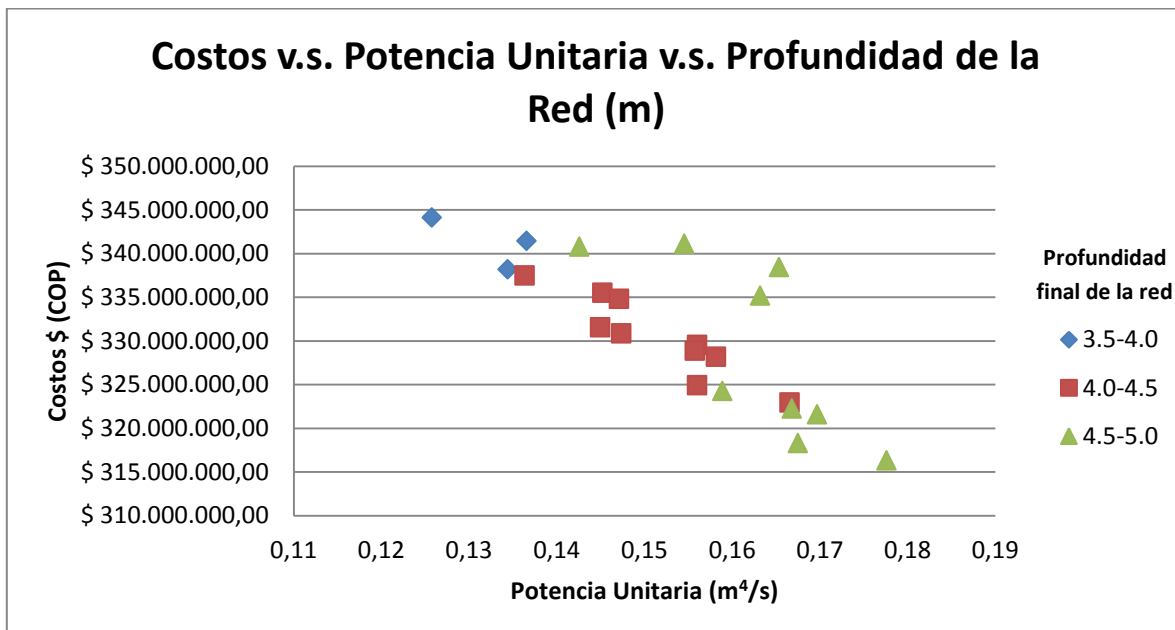


Figura 4.29. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 8.

4.9. Ciudad 9 de 10 tramos

Tabla 4.17. Tramos escogidos para la Ciudad # 9, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
11	3	24	105
31	3	34	105
51	4	44	105
71	4	54	105
91	5	64	105
111	4	74	105
131	4	84	105
151	5	94	105
171	5	104	105
191	5	114	105
1,440,000		Alternativas posibles	
129		Alternativas viables	
2.26 días		Costo Computacional	

Tabla 4.18. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 9 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
11	1	10	0.024	0.002	105	0.00504	\$ 28,292,080.28	
31	1	10	0.034	0.003	105	0.01071	\$ 28,375,395.60	
51	2	10	0.044	0.004	105	0.01848	\$ 28,467,934.40	
71	1	14	0.054	0.002	105	0.01134	\$ 34,303,610.06	
91	2	14	0.064	0.003	105	0.02016	\$ 34,395,877.28	
111	2	14	0.074	0.003	105	0.02331	\$ 34,395,877.28	
131	2	14	0.084	0.004	105	0.03528	\$ 34,498,359.00	
151	3	14	0.094	0.005	105	0.04935	\$ 34,609,173.23	
171	2	18	0.104	0.003	105	0.03276	\$ 39,717,875.37	
191	2	18	0.114	0.004	105	0.04788	\$ 39,830,533.92	
Cambios de diámetro		3				P.U. total	0.25431	
						Costo total	\$ 336,886,716.40	

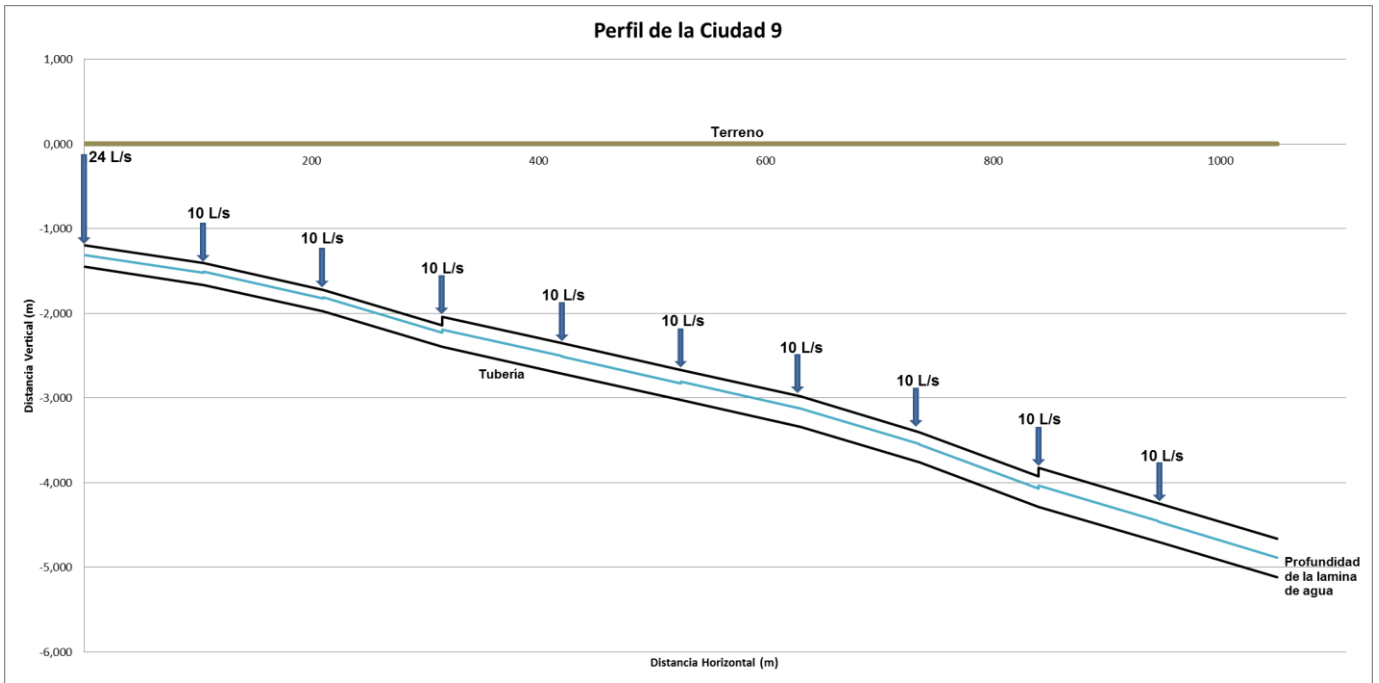


Figura 4.30. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 9.

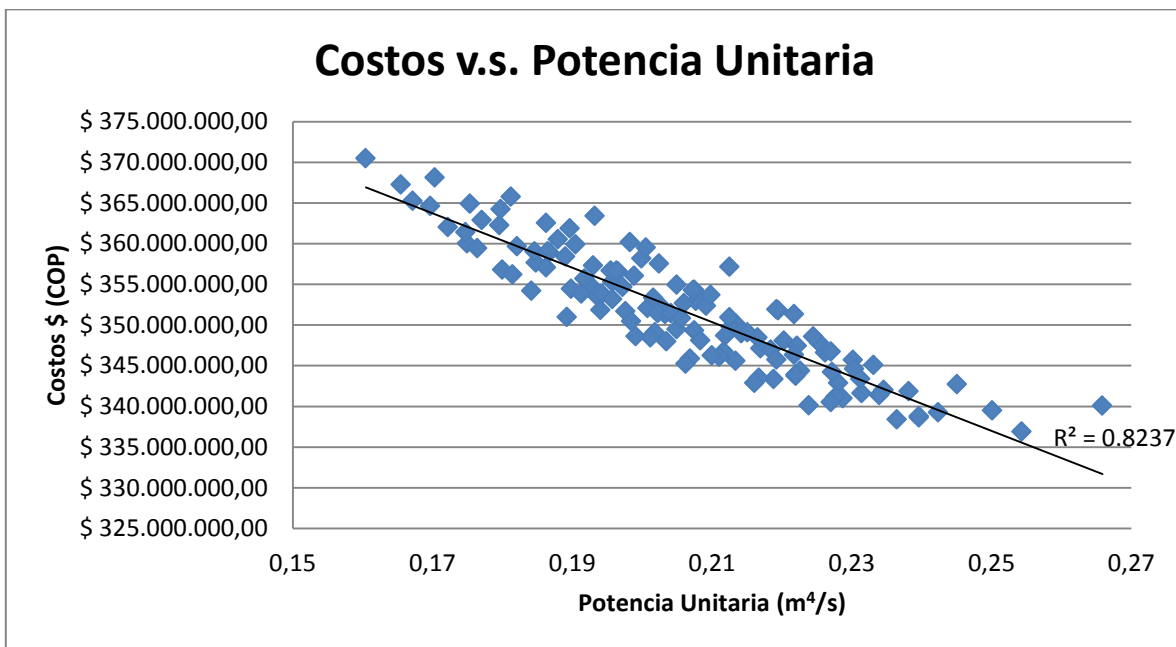


Figura 4.31. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 9.

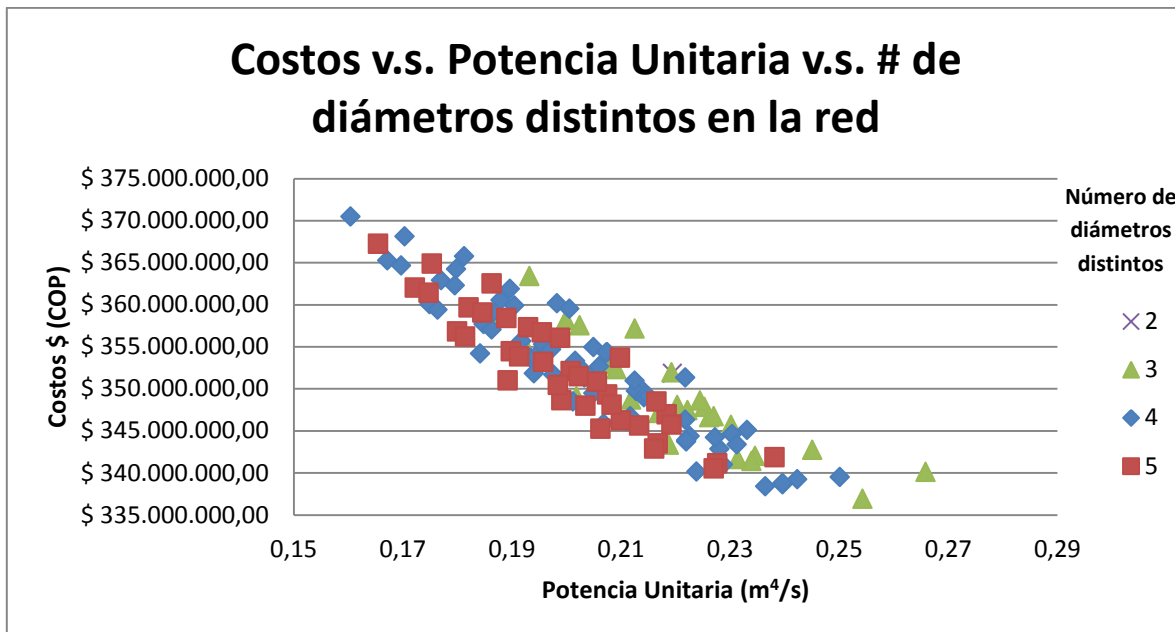


Figura 4.32. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 9.

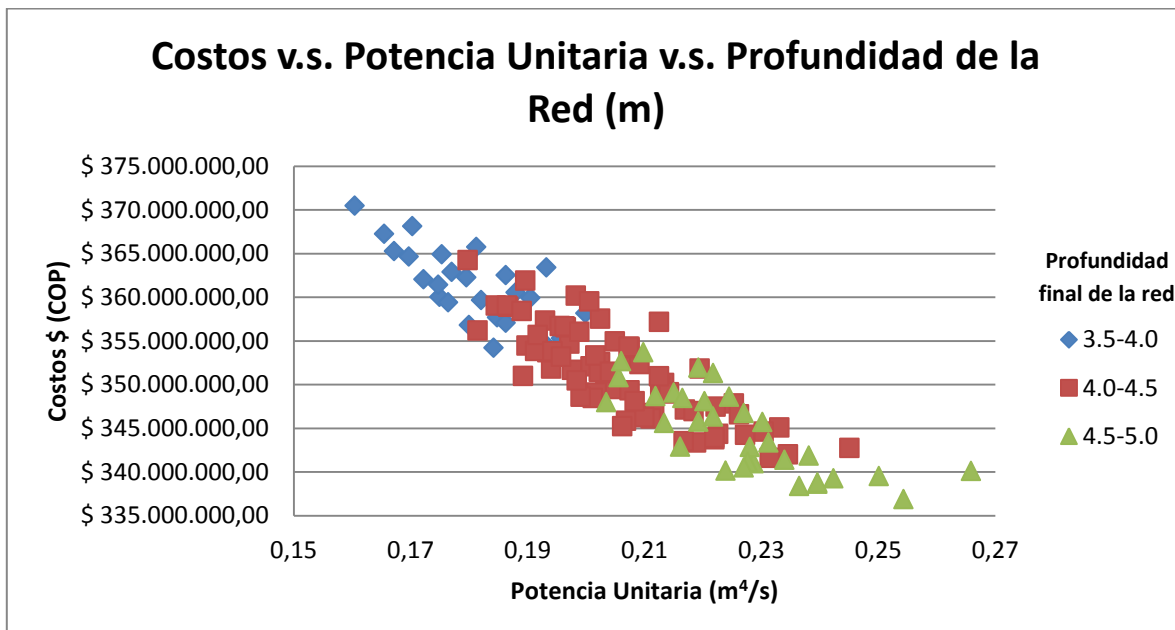


Figura 4.33. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 9.

4.10. Ciudad 10 de 9 tramos

Tabla 4.19. Tramos escogidos para la Ciudad # 10, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
2	2	20	90
26	3	32	90
50	4	44	90
74	4	56	90
98	5	68	90
122	4	80	90
146	5	92	90
170	5	104	90
194	5	116	90
240,000		Alternativas posibles	
206		Alternativas viables	
9.17 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.20. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 10 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
2	1	8	0.02	0.003	90	0.0054	\$ 21,374,624.09
26	1	10	0.032	0.002	90	0.00576	\$ 24,227,838.67
50	2	10	0.044	0.004	90	0.01584	\$ 24,345,261.34
74	2	10	0.056	0.006	90	0.03024	\$ 24,483,187.30
98	2	14	0.068	0.003	90	0.01836	\$ 29,439,768.62
122	2	14	0.08	0.004	90	0.0288	\$ 29,508,198.50
146	3	14	0.092	0.005	90	0.0414	\$ 29,582,192.24
170	3	14	0.104	0.006	90	0.05616	\$ 29,660,944.07
194	2	18	0.1159	0.004	90	0.04176	\$ 34,072,494.84
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.24372
						Costo total	\$ 246,694,509.68

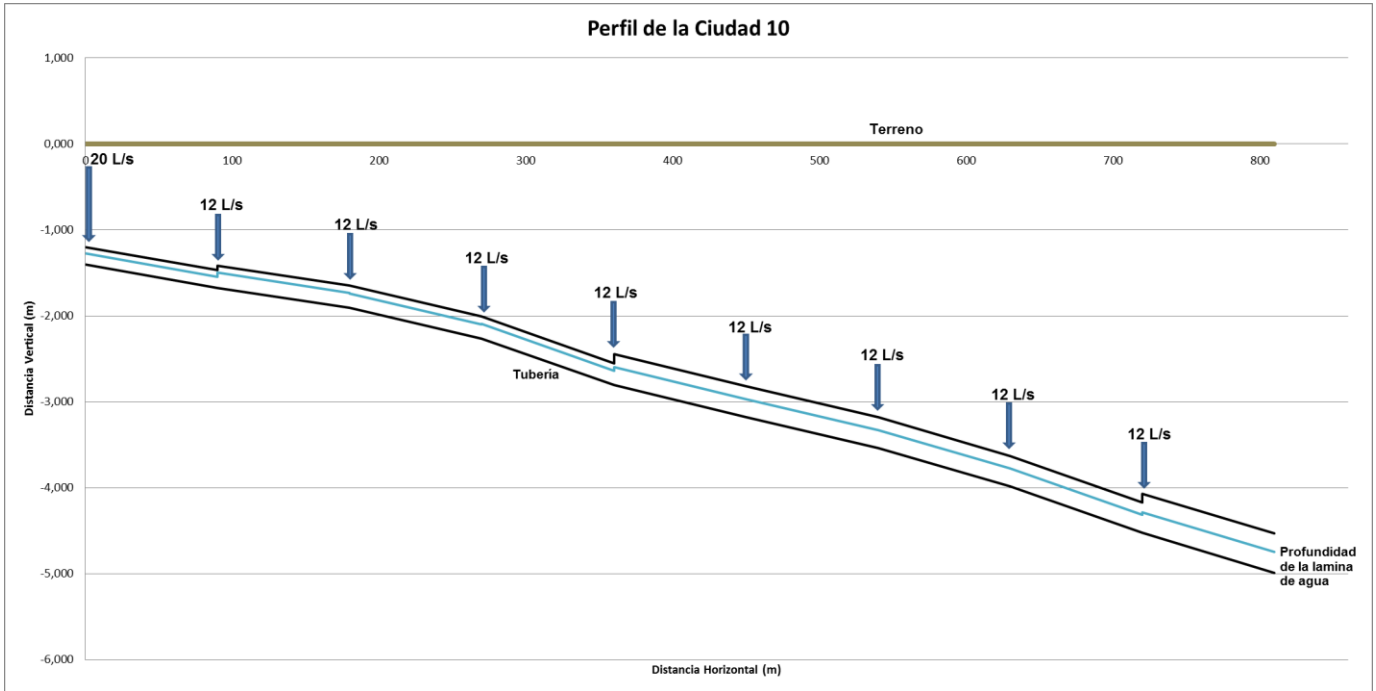


Figura 4.34. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 10.

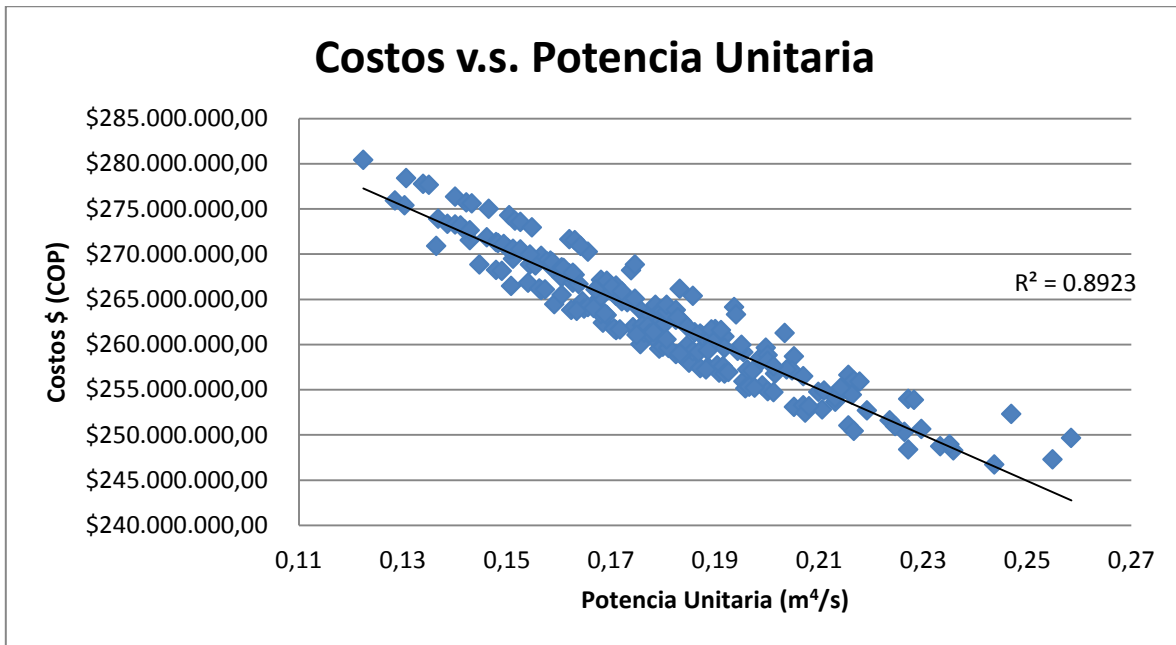


Figura 4.35. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 10.

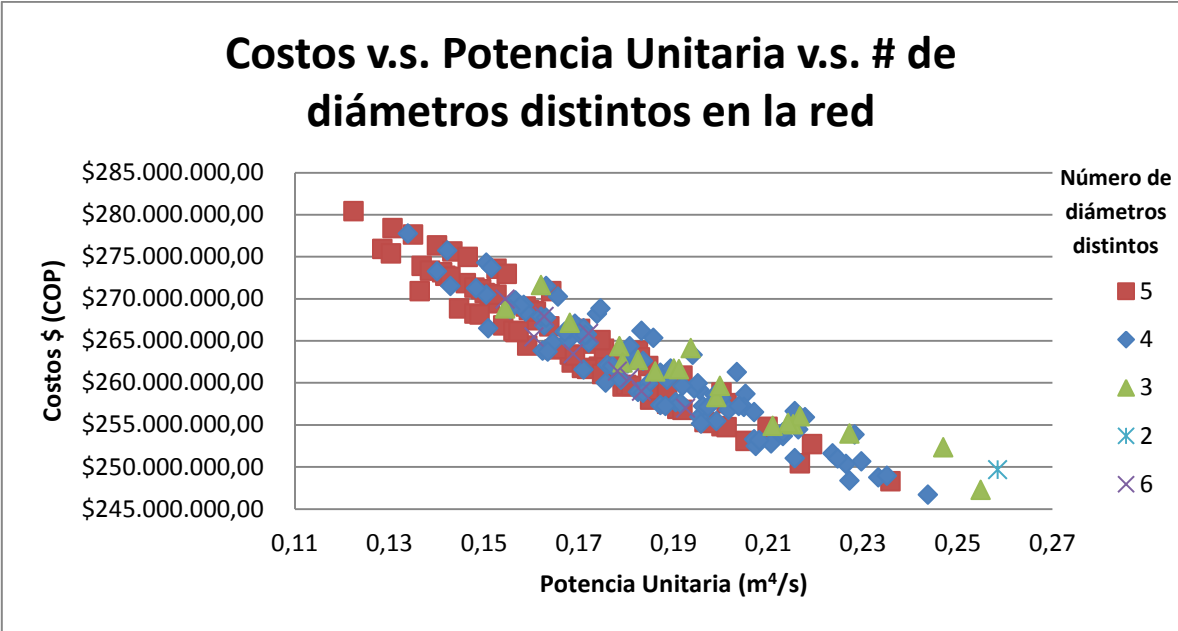


Figura 4.36. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 10.

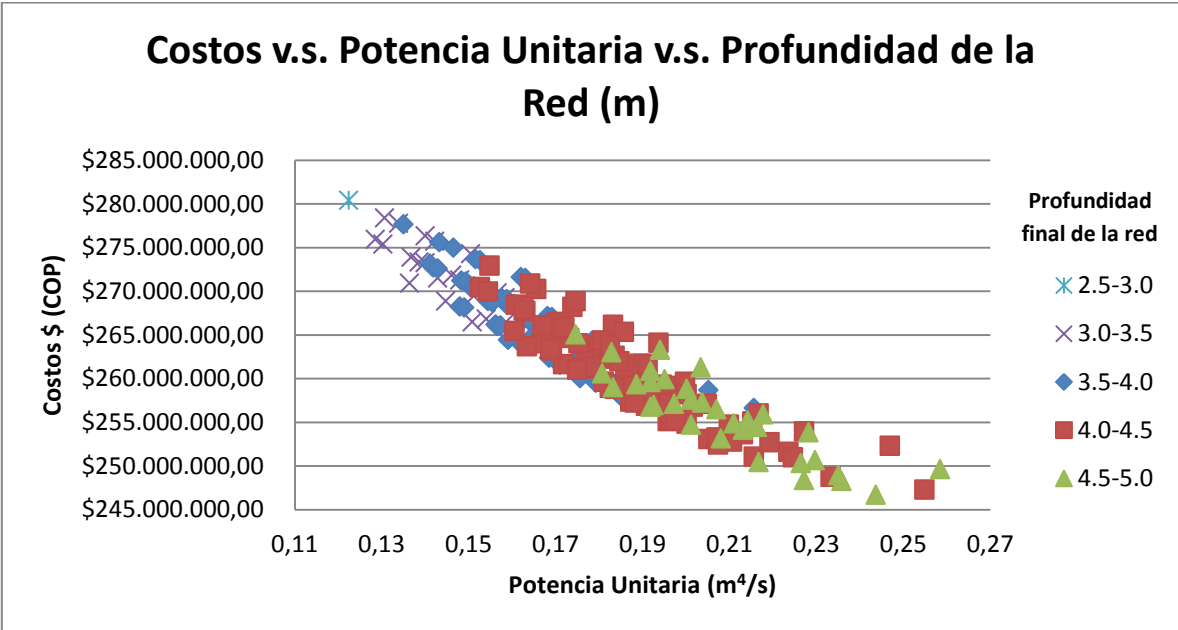


Figura 4.37. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 10.

4.11. Ciudad 11 de 9 tramos

Tabla 4.21. Tramos escogidos para la Ciudad # 11, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
3	2	20	90
38	3	38	90
70	4	54	90
98	5	68	90
122	4	80	90
142	5	90	90
158	5	98	90
170	5	104	90
178	5	108	90
300,000		Alternativas posibles	
178		Alternativas viables	
9.84 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.22. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 11 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
3	1	8	0.02	0.003	105	0.0063	\$ 24,979,385.26	
38	1	10	0.038	0.003	90	0.01026	\$ 24,283,470.62	
70	2	10	0.054	0.005	90	0.0243	\$ 24,412,076.09	
98	2	14	0.068	0.003	90	0.01836	\$ 29,439,768.62	
122	2	14	0.08	0.004	90	0.0288	\$ 29,508,198.50	
142	3	14	0.09	0.004	90	0.0324	\$ 29,508,198.50	
158	3	14	0.098	0.005	90	0.0441	\$ 29,582,192.24	
170	3	14	0.104	0.006	90	0.05616	\$ 29,660,944.07	
178	2	18	0.108	0.004	90	0.03888	\$ 34,072,494.84	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.25956	
						Costo total	\$ 255,446,728.74	

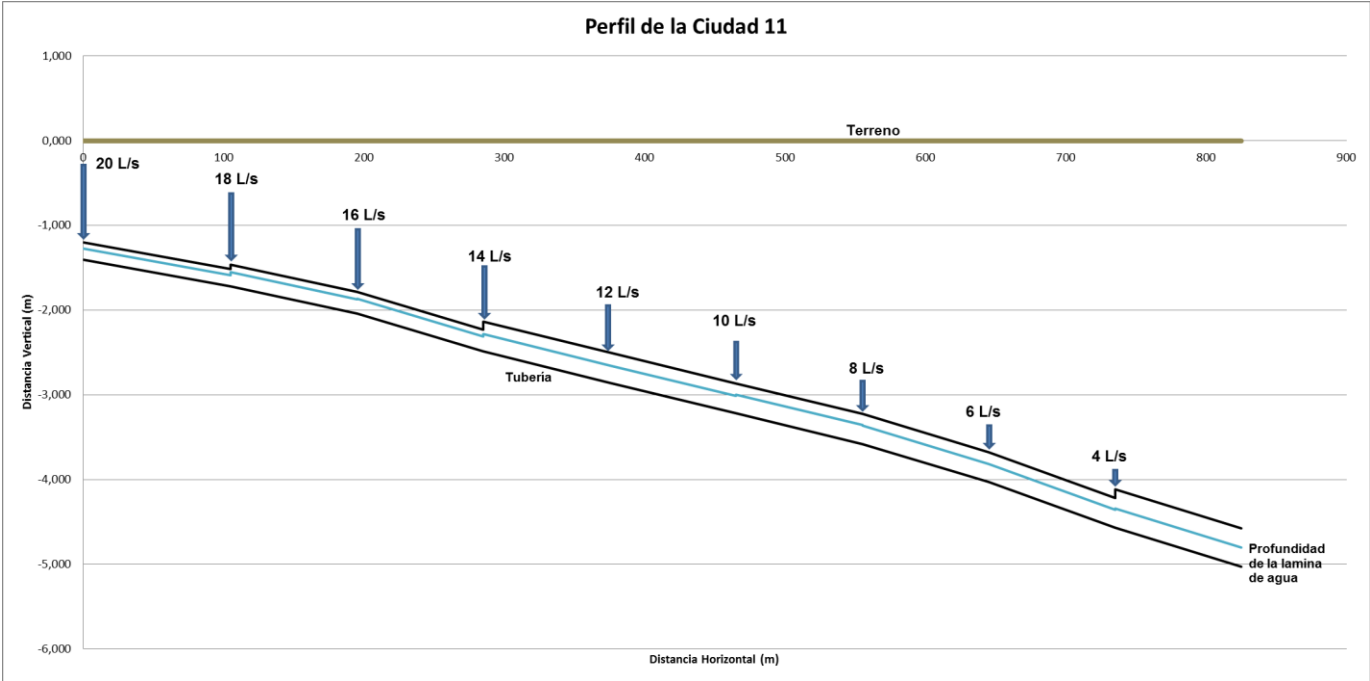


Figura 4.38. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 11.

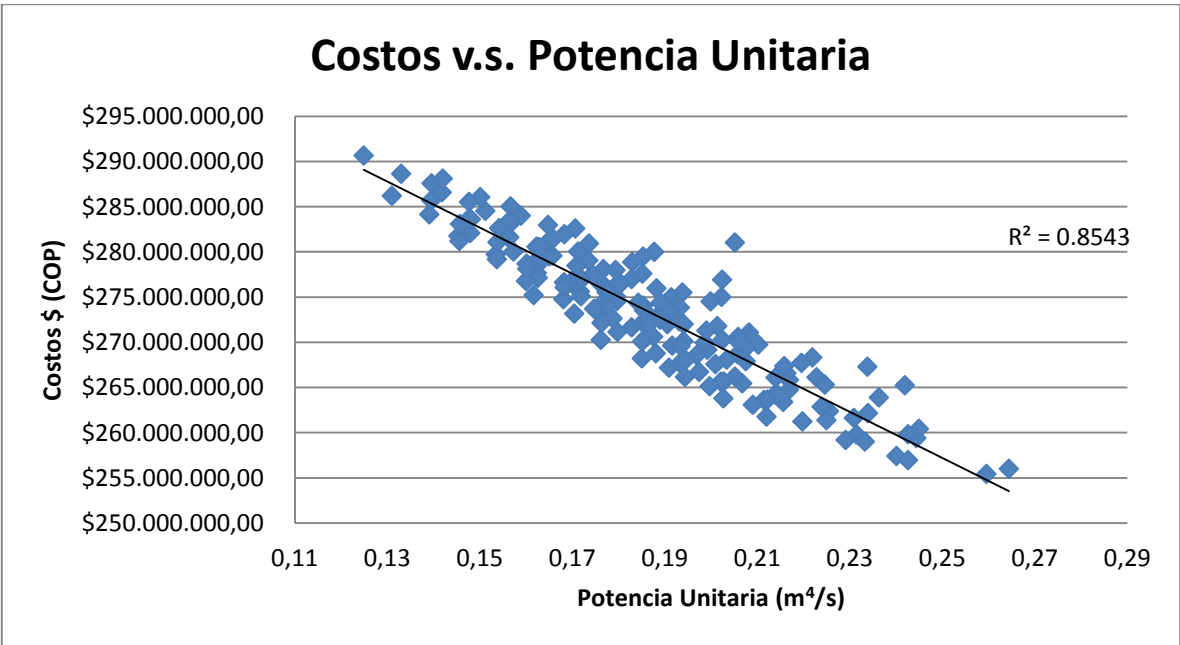


Figura 4.39. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 11.

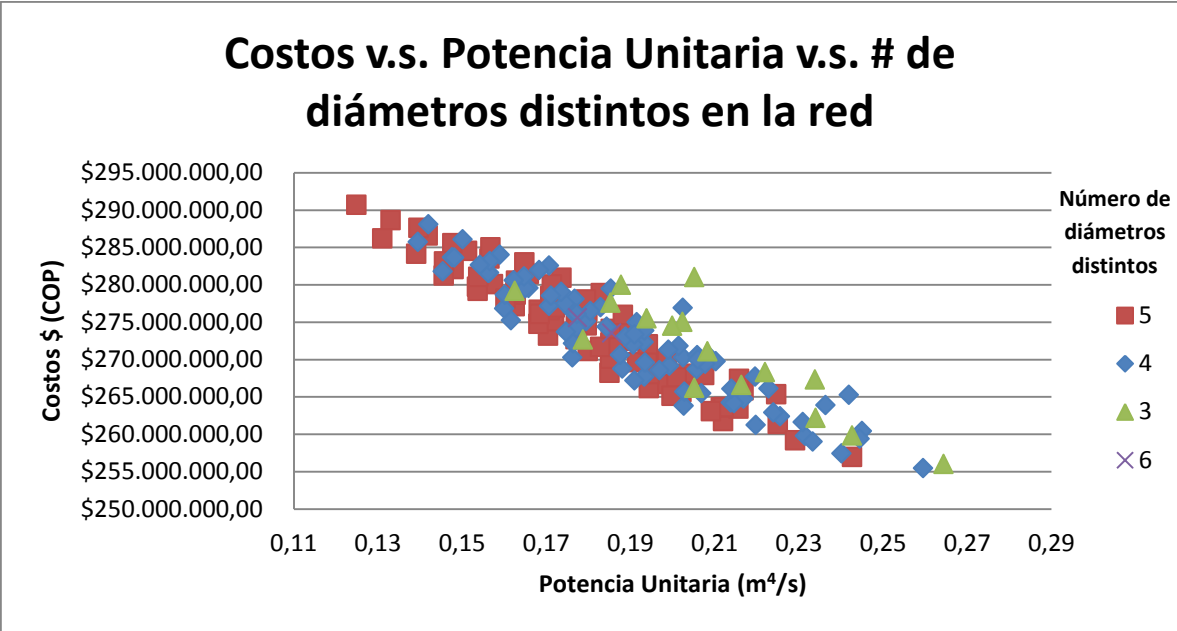


Figura 4.40. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 11.

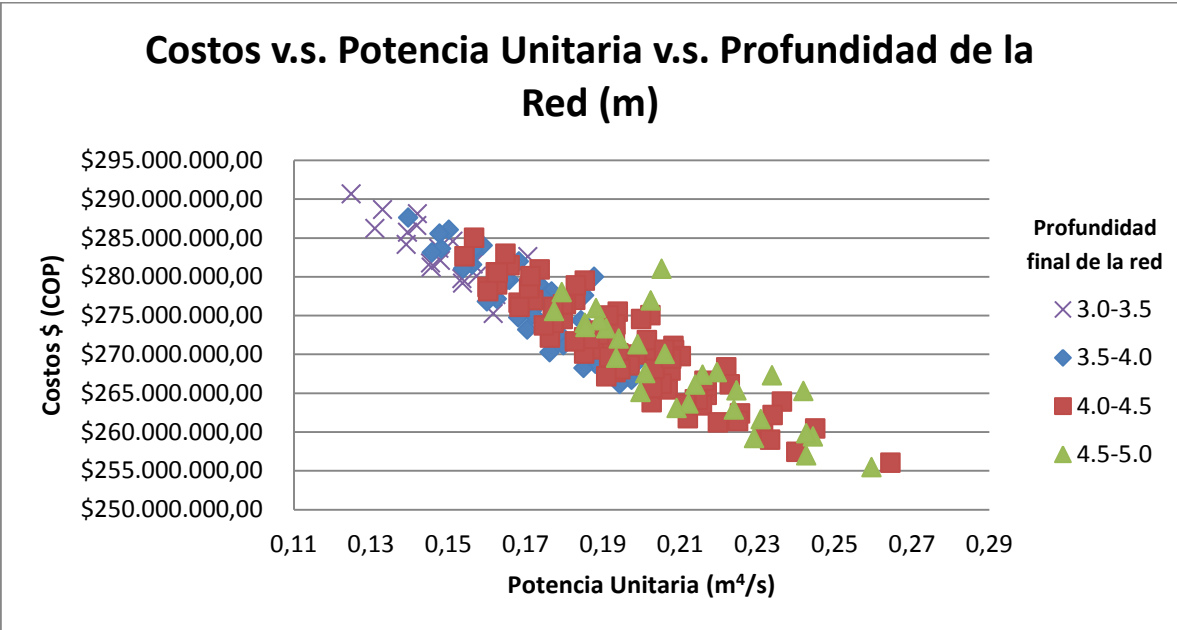


Figura 4.41. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 11.

4.12. Ciudad 12 de 9 tramos

Tabla 4.23. Tramos escogidos para la Ciudad # 12, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	90
8	2	22	90
12	3	24	90
16	3	26	90
20	3	28	90
24	3	30	90
28	3	32	90
32	3	34	90
36	3	36	90
8,748		Alternativas posibles	
5		Alternativas viables	
0.38 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.24. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 12 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
8	1	8	0.022	0.003	120	0.00792	\$ 28,600,729.65	
12	2	8	0.024	0.004	120	0.01152	\$ 28,725,105.34	
16	2	8	0.026	0.004	120	0.01248	\$ 28,725,105.34	
20	2	8	0.028	0.005	120	0.0168	\$ 28,859,593.69	
24	1	10	0.03	0.002	120	0.0072	\$ 32,366,614.37	
28	1	10	0.032	0.002	120	0.00768	\$ 32,366,614.37	
32	1	10	0.034	0.003	120	0.01224	\$ 32,484,826.97	
36	1	10	0.036	0.003	120	0.01296	\$ 32,484,826.97	
Cambios de diámetro		2				P.U. total	0.096	
						Costo total	\$ 273,214,146.33	

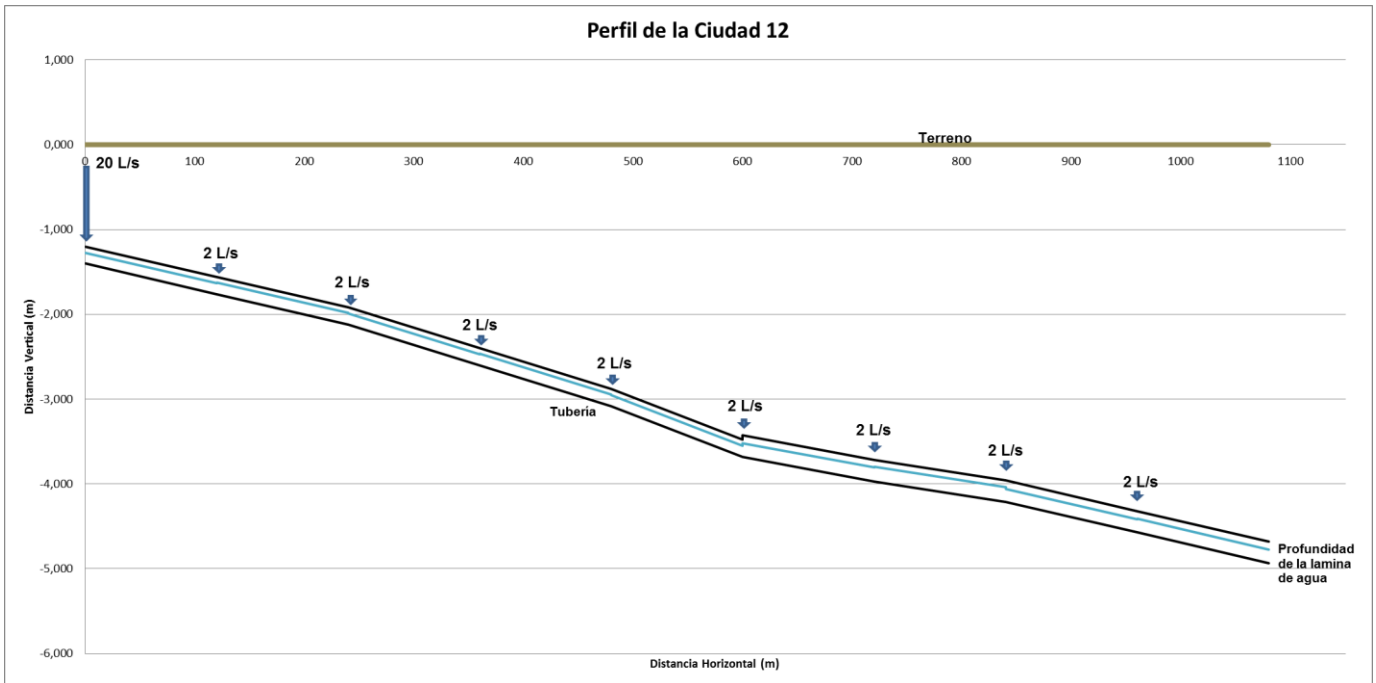


Figura 4.42. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 12.

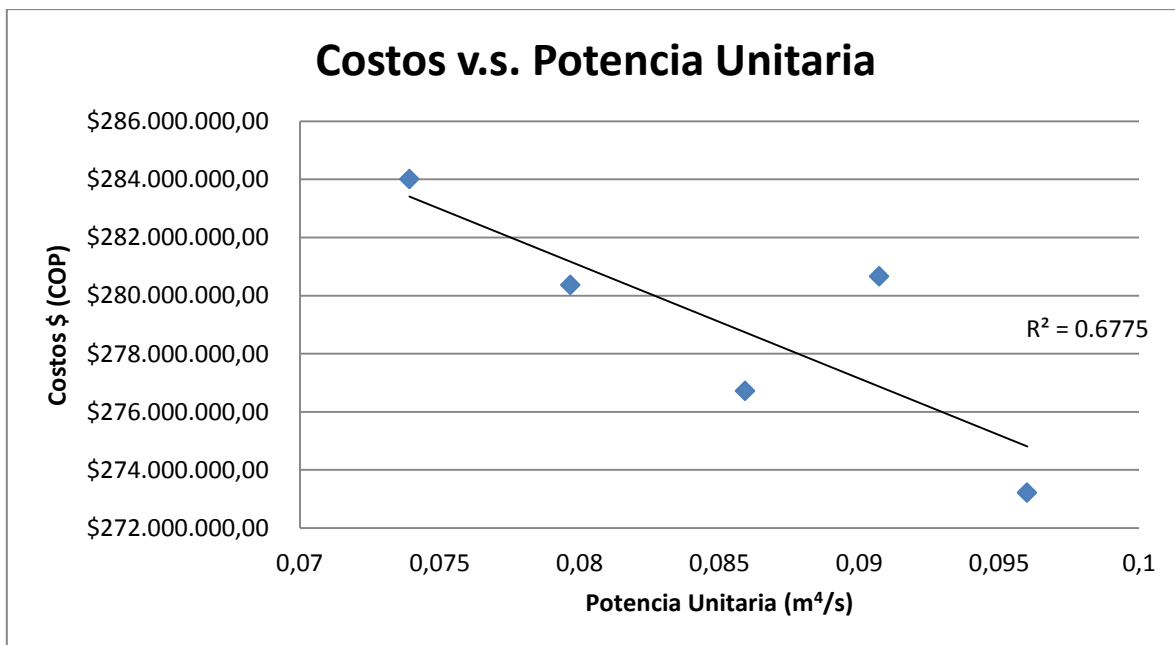


Figura 4.43. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 12.

La baja cantidad de datos en esta ciudad no permite tener un R^2 confiable.

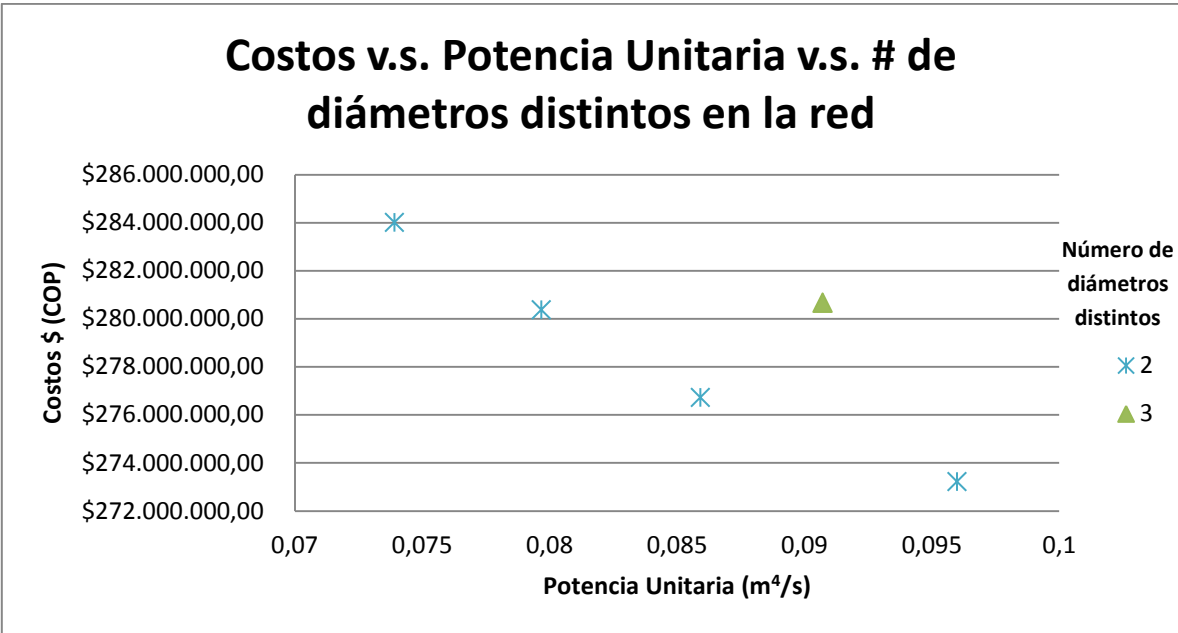


Figura 4.44. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 12.

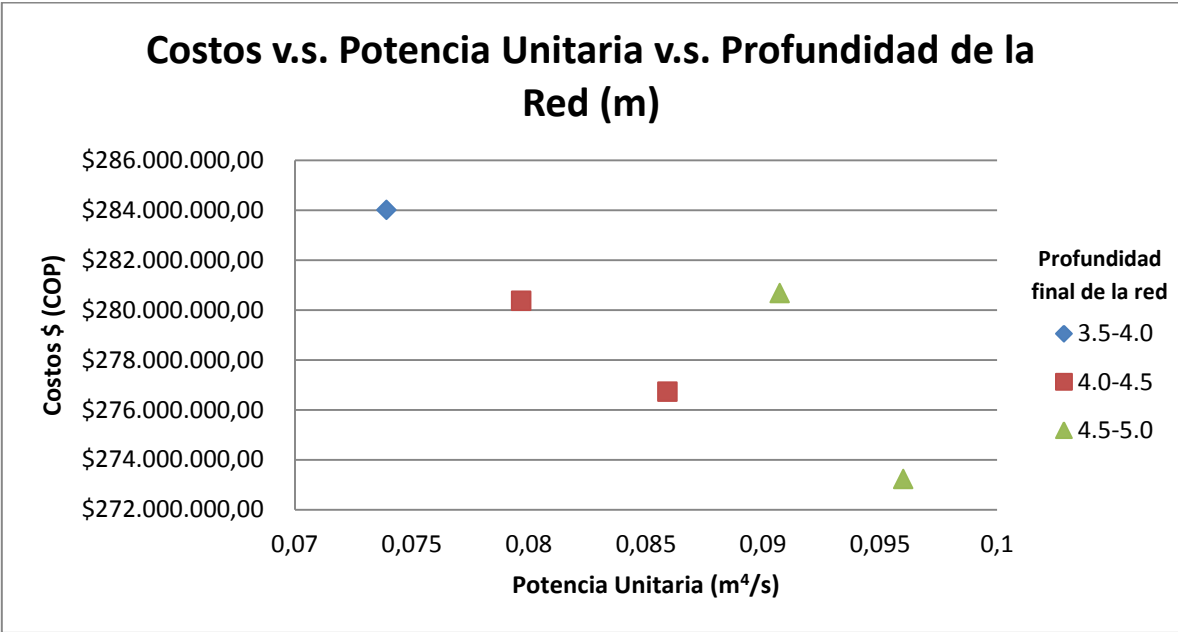


Figura 4.45. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 12.

4.13. Ciudad 13 de 9 tramos

Tabla 4.25. Tramos escogidos para la Ciudad # 13, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
24	3	30	120
64	4	50	120
84	4	60	120
124	4	80	120
144	5	90	120
184	5	110	120
204	5	120	120
220	5	128	120
240,000		Alternativas posibles	
37		Alternativas viables	
9.34 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.26. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 13 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
24	1	10	0.03	0.002	120	0.0072	\$ 32,366,614.37	
64	1	14	0.05	0.002	120	0.012	\$ 39,240,459.23	
84	1	14	0.06	0.002	120	0.0144	\$ 39,240,459.23	
124	2	14	0.08	0.004	120	0.0384	\$ 39,516,780.31	
144	3	14	0.09	0.004	120	0.0432	\$ 39,516,780.31	
184	3	14	0.11	0.006	120	0.0792	\$ 39,841,350.10	
204	1	20	0.12	0.003	120	0.0432	\$ 48,286,645.23	
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.29088	
						Costo total	\$ 354,896,463.64	

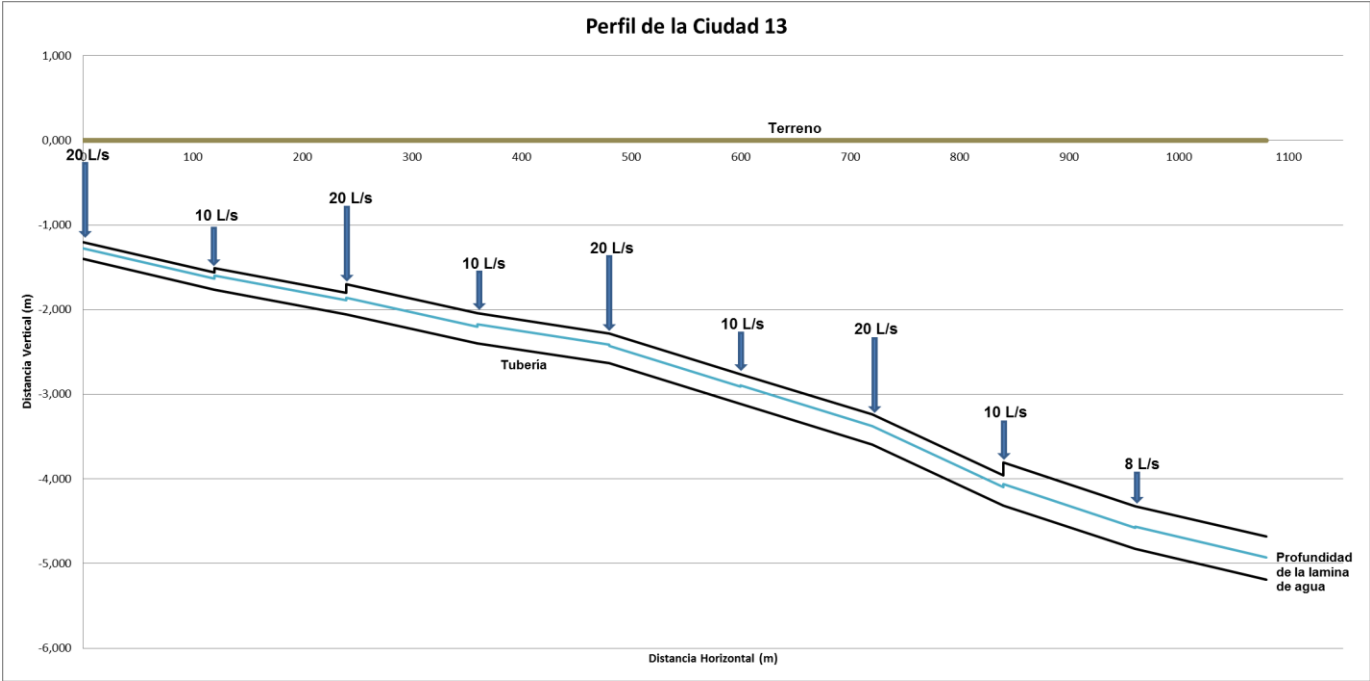


Figura 4.46. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 13.

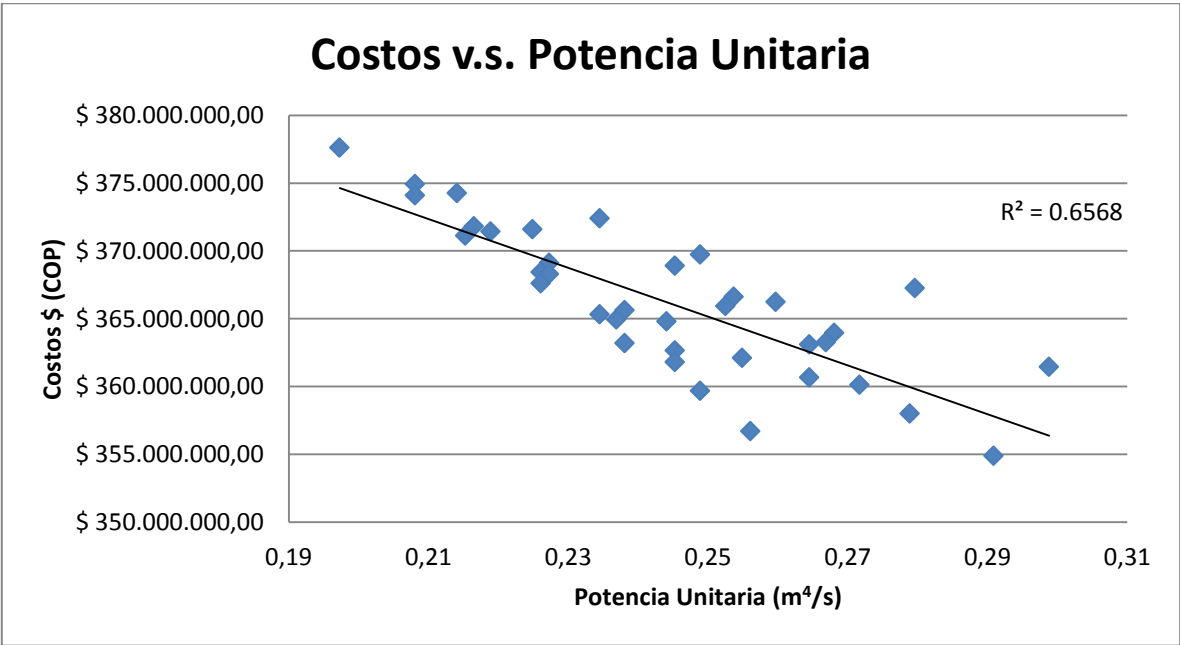


Figura 4.47. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 13.

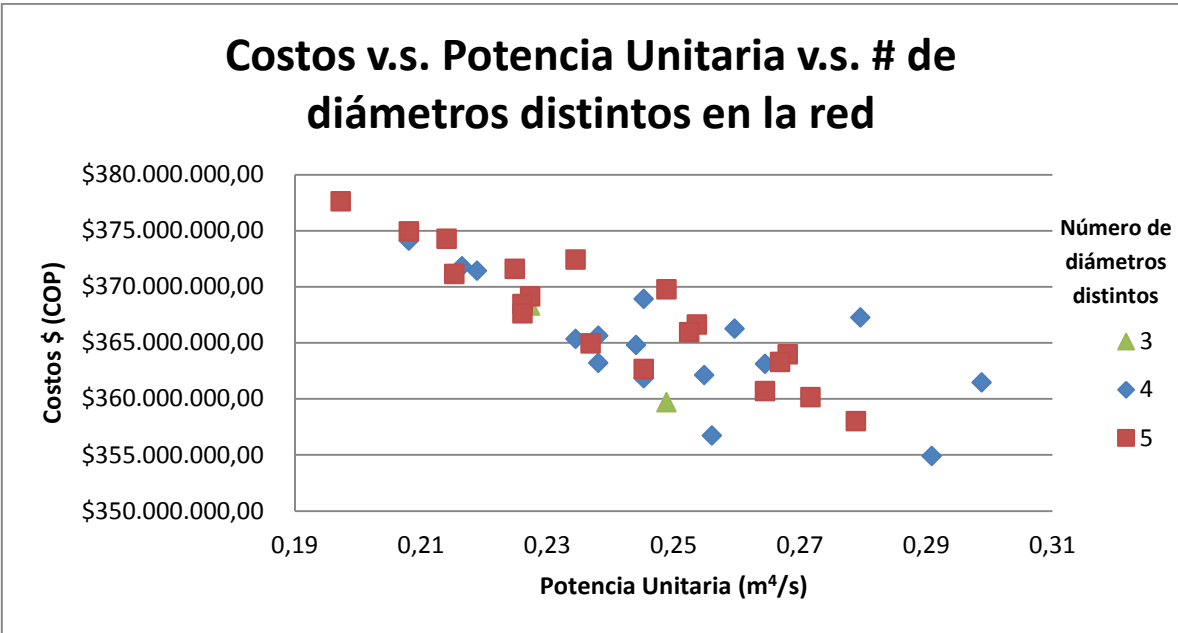


Figura 4.48. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 13.

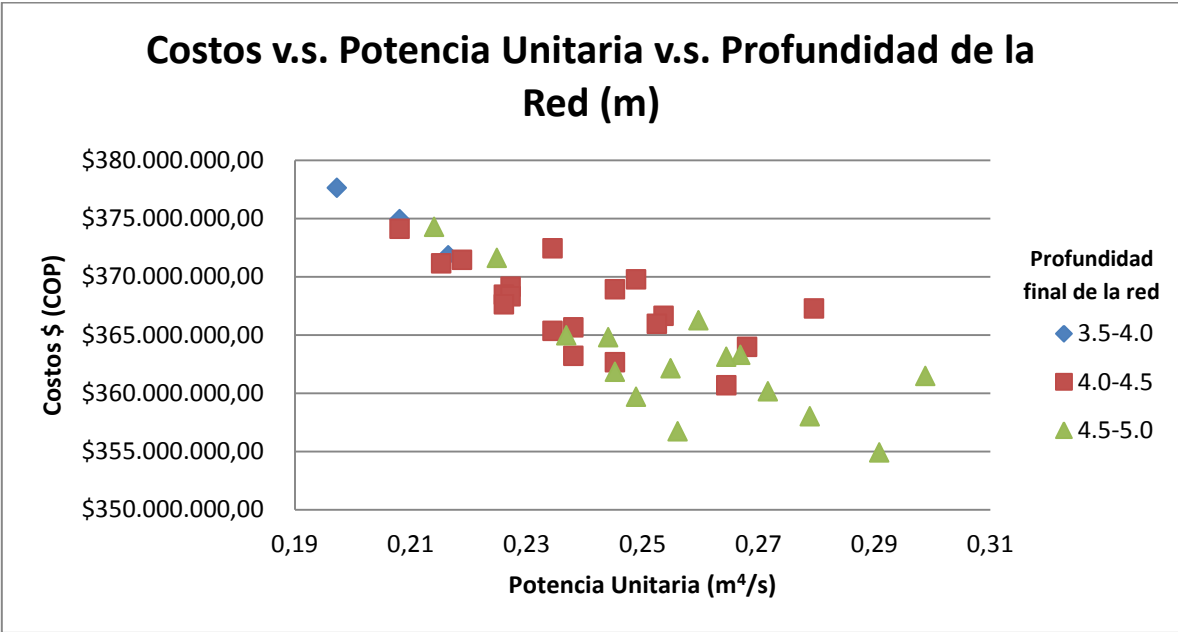


Figura 4.49. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 13.

4.14. Ciudad 14 de 9 tramos

Tabla 4.27. Tramos escogidos para la Ciudad # 14, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
12	3	24	120
44	3	40	120
64	4	50	120
76	4	56	120
80	4	58	120
92	5	64	120
112	4	74	120
144	5	90	120
192	5	114	120
288,000		Alternativas posibles	
54		Alternativas viables	
8.78 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.28. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 14 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
12	2	8	0.024	0.004	120	0.01152	\$ 28,725,105.34
44	1	10	0.04	0.003	120	0.0144	\$ 32,484,826.97
64	2	10	0.05	0.005	120	0.03	\$ 32,758,101.37
76	1	14	0.056	0.002	120	0.01344	\$ 39,240,459.23
80	1	14	0.0579	0.002	120	0.01392	\$ 39,240,459.23
92	2	14	0.064	0.003	120	0.02304	\$ 39,371,373.30
112	2	14	0.074	0.003	120	0.02664	\$ 39,371,373.30
144	3	14	0.09	0.004	120	0.0432	\$ 39,516,780.31
192	1	20	0.114	0.003	120	0.04104	\$ 48,286,645.23
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.2172
						Costo total	\$ 338,995,124.28

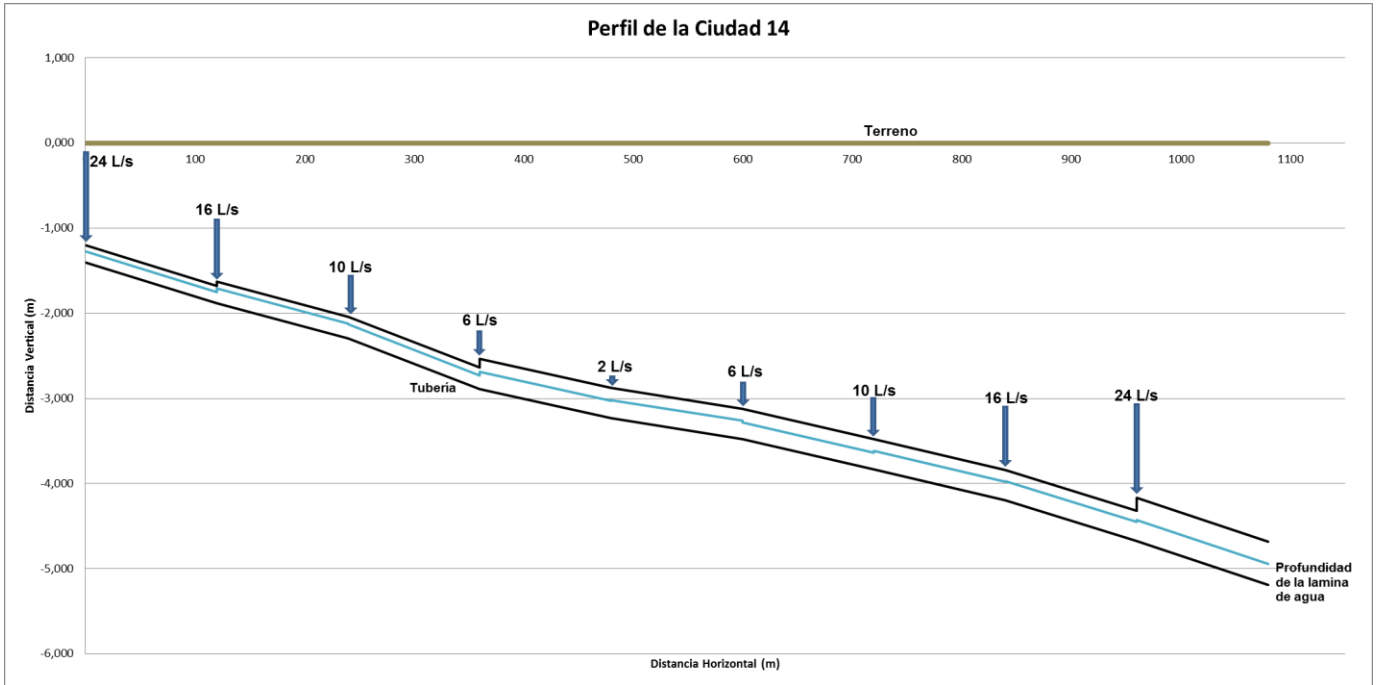


Figura 4.50. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 14.

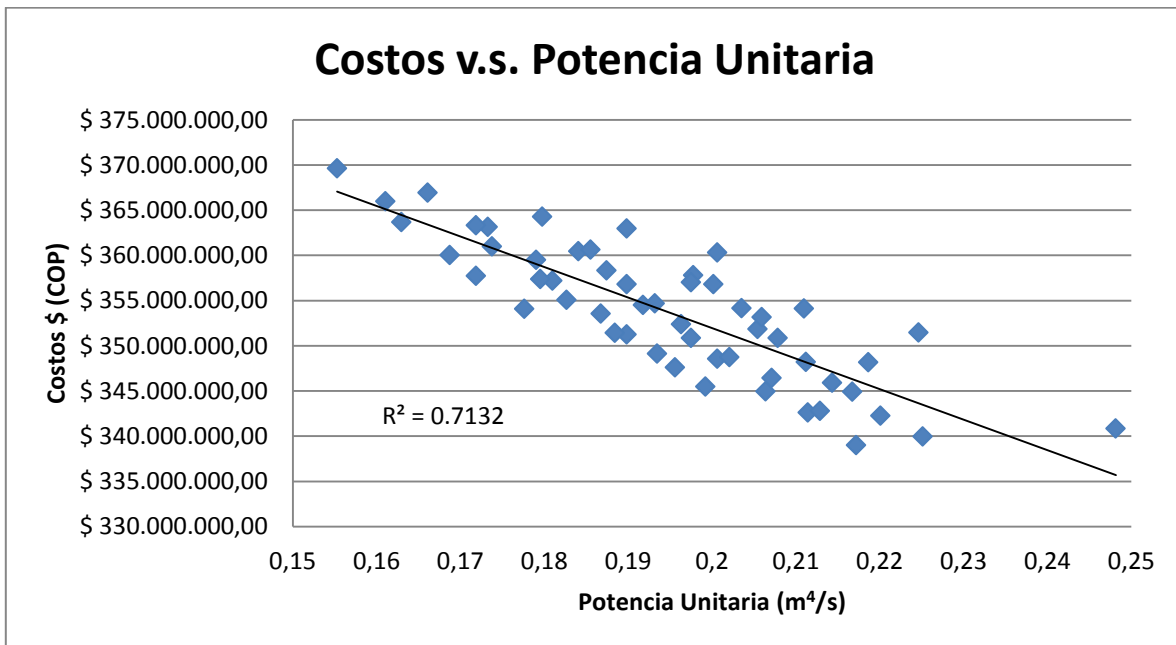


Figura 4.51. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 14.

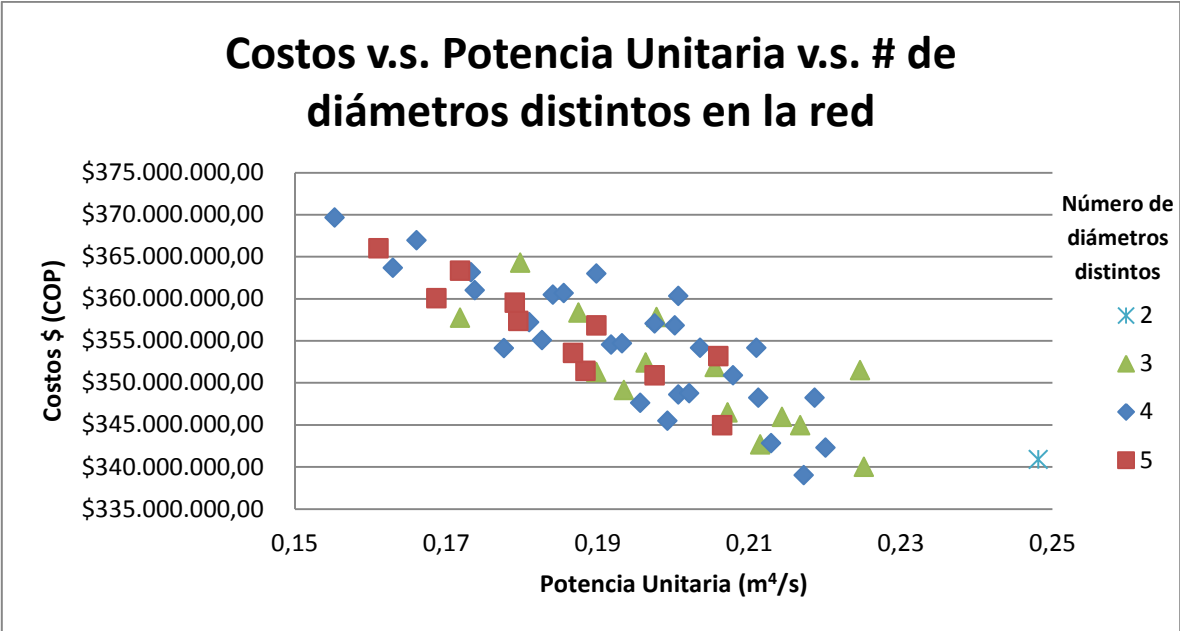


Figura 4.52. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 14.

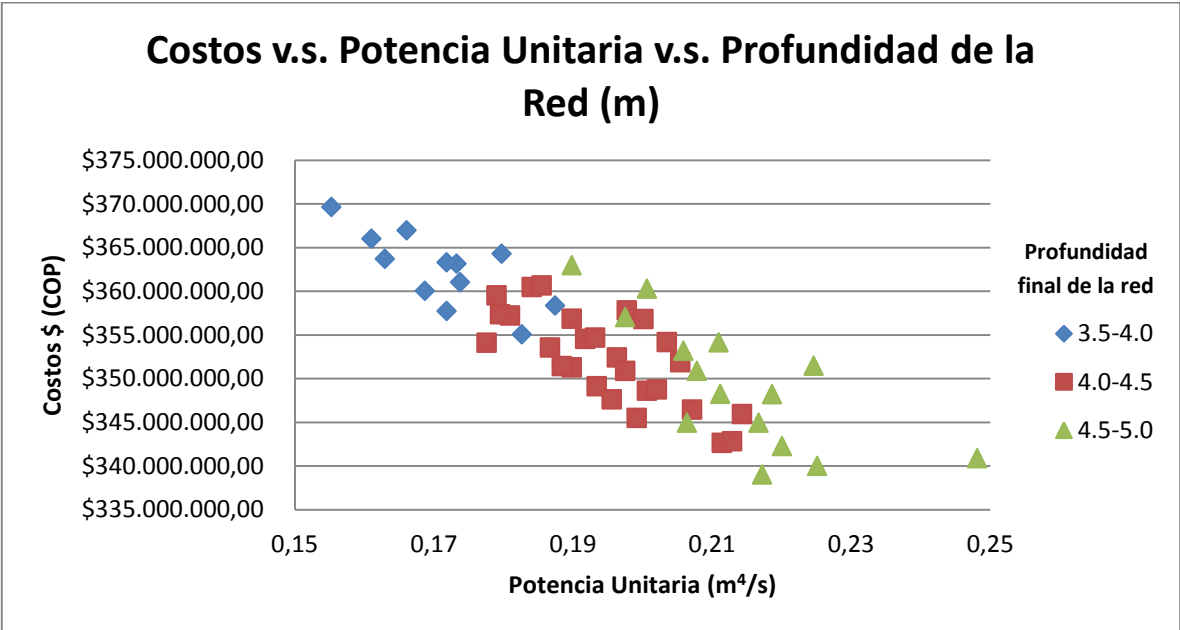


Figura 4.53. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 14.

4.15. Ciudad 15 de 9 tramos

Tabla 4.29. Tramos escogidos para la Ciudad # 15, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
3	2	20	105
11	3	24	105
23	3	30	105
39	3	38	105
59	4	48	105
83	4	60	105
111	4	74	105
143	5	90	105
179	5	108	105
	86,400	Alternativas posibles	
	114	Alternativas viables	
	3.5 horas	Costo Computacional	

Tabla 4.30. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 15 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
3	1	8	0.02	0.003	105	0.0063	\$ 24,979,385.26
11	1	10	0.024	0.002	105	0.00504	\$ 28,292,080.28
23	1	10	0.03	0.002	105	0.0063	\$ 28,292,080.28
39	1	10	0.038	0.003	105	0.01197	\$ 28,375,395.60
59	2	10	0.048	0.004	105	0.02016	\$ 28,467,934.40
83	2	10	0.06	0.006	105	0.0378	\$ 28,674,494.59
111	2	14	0.074	0.003	105	0.02331	\$ 34,395,877.28
143	3	14	0.09	0.004	105	0.0378	\$ 34,498,359.00
179	3	14	0.108	0.006	105	0.06804	\$ 34,727,113.26
Cambios de diámetro		3			P.U. total	0.21672	
						Costo total	\$ 270,702,719.94

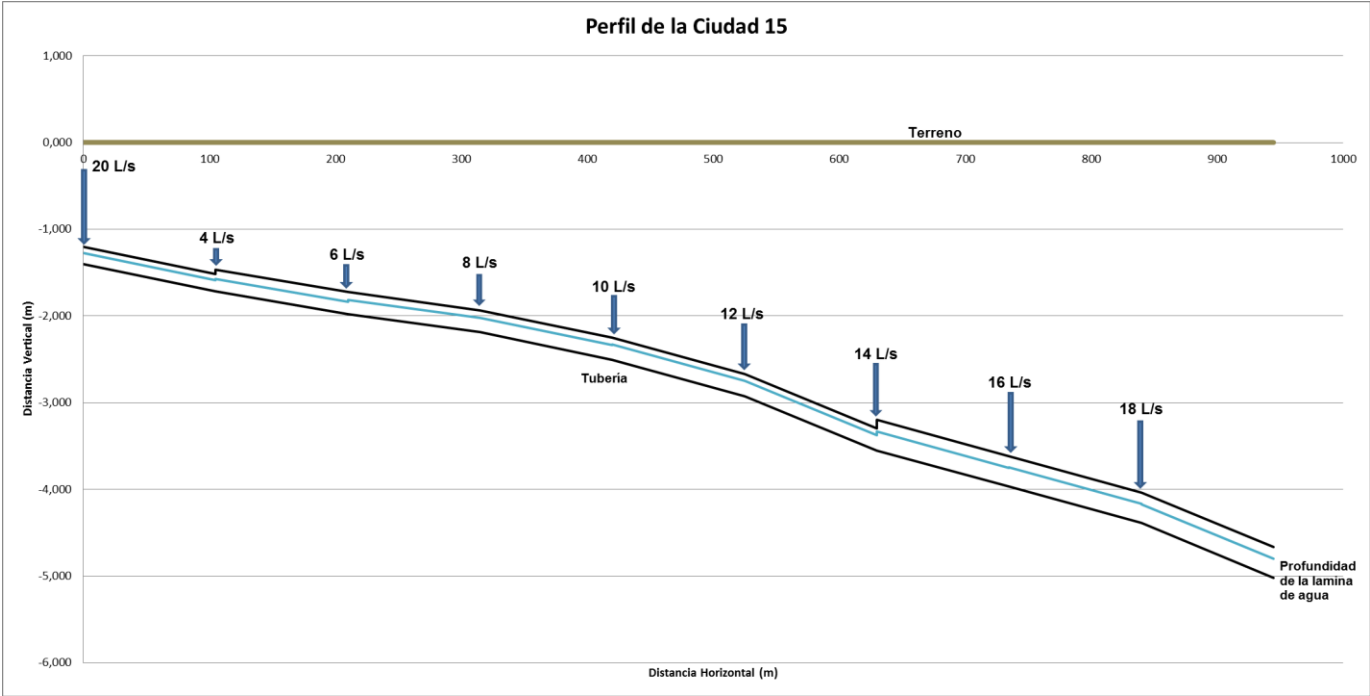


Figura 4.54. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 15.

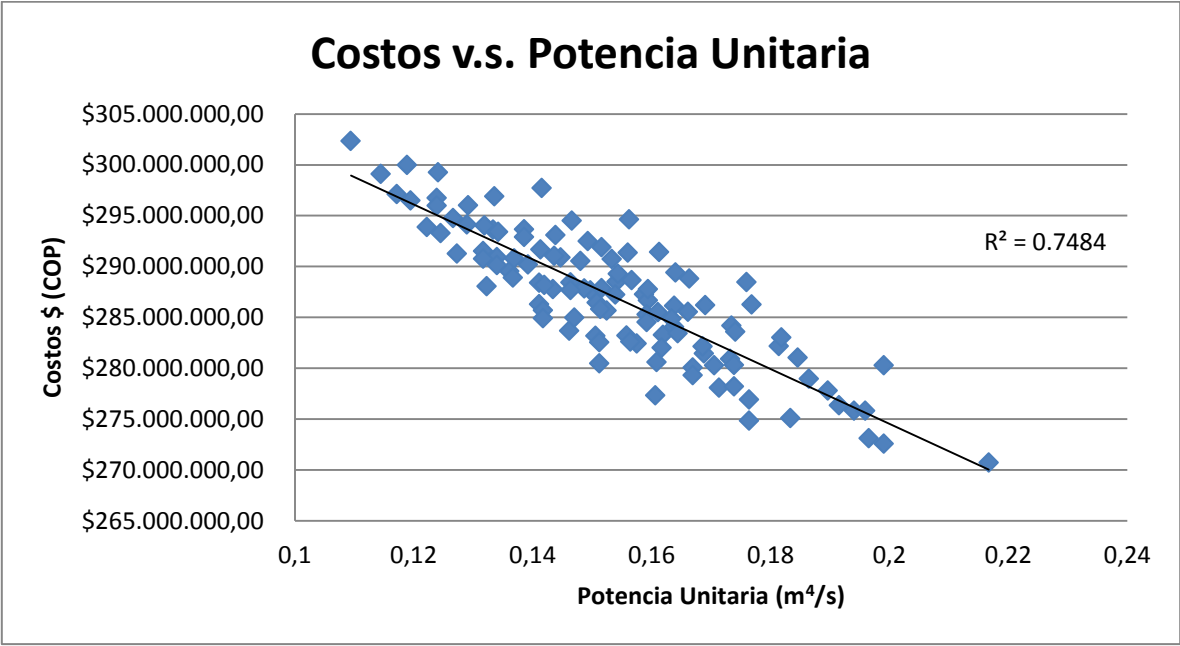


Figura 4.55. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 15.

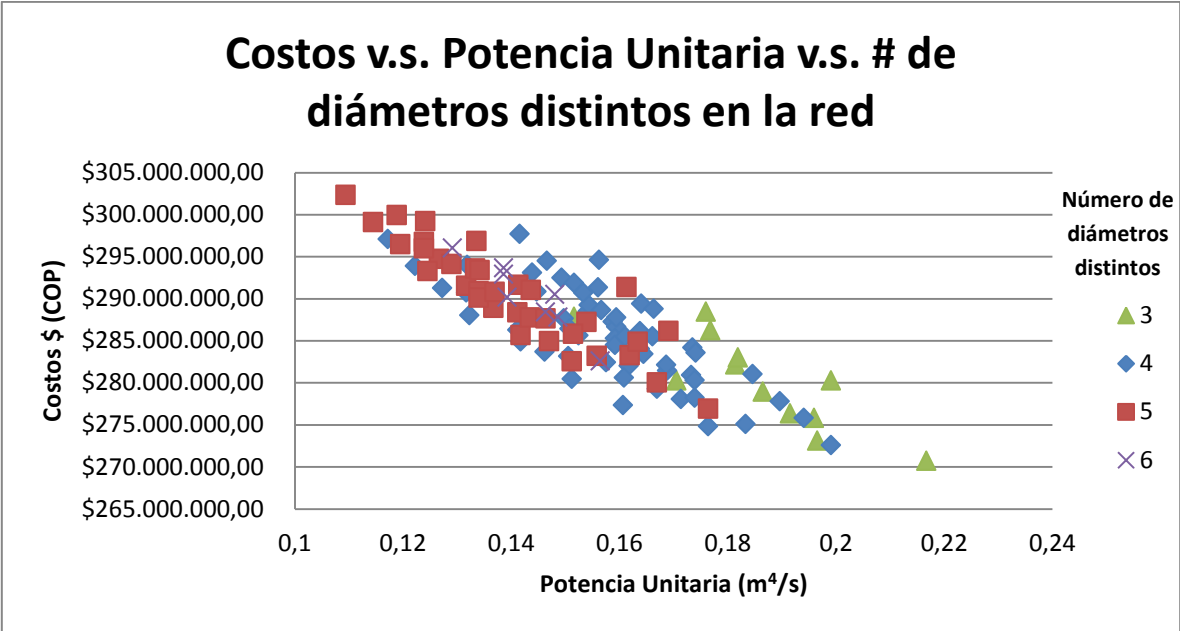


Figura 4.56. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 15.

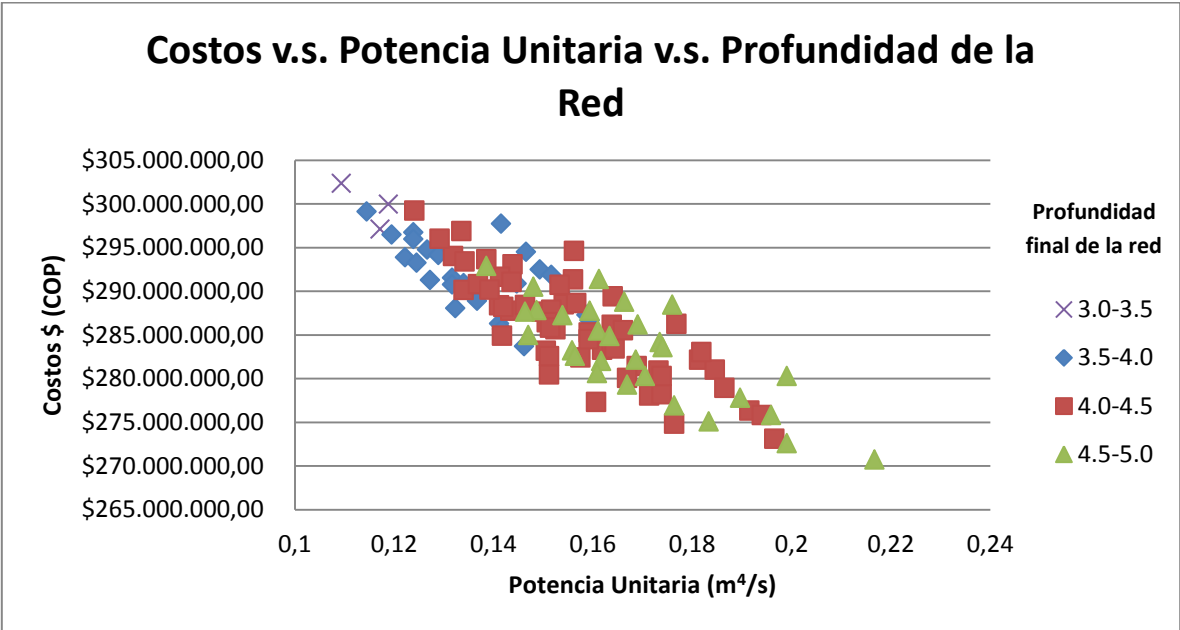


Figura 4.57. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 15.

4.16. Ciudad 16 de 9 tramos

Tabla 4.31. Tramos escogidos para la Ciudad # 16, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
24	3	30	120
44	3	40	120
64	4	50	120
88	5	62	120
116	4	76	120
148	5	92	120
184	5	110	120
220	5	128	120
180,000		Alternativas posibles	
45		Alternativas viables	
7.28 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.32. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 16 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
24	1	10	0.03	0.002	120	0.0072	\$ 32,366,614.37	
44	1	10	0.04	0.003	120	0.0144	\$ 32,484,826.97	
64	2	10	0.05	0.005	120	0.03	\$ 32,758,101.37	
88	2	14	0.062	0.003	120	0.02232	\$ 39,371,373.30	
116	2	14	0.076	0.003	120	0.02736	\$ 39,371,373.30	
148	3	14	0.092	0.005	120	0.0552	\$ 39,674,009.95	
184	1	20	0.11	0.002	120	0.0264	\$ 48,136,123.31	
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.23616	
						Costo total	\$ 341,049,797.44	

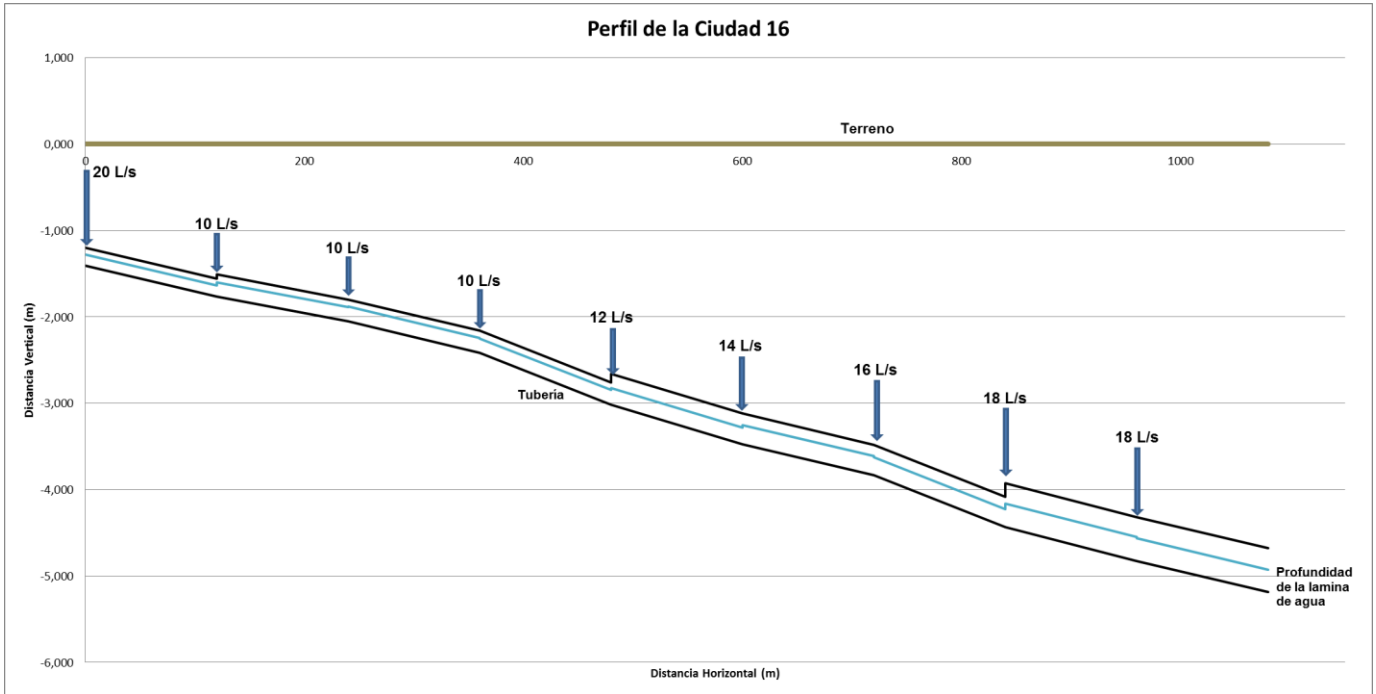


Figura 4.58. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 16.

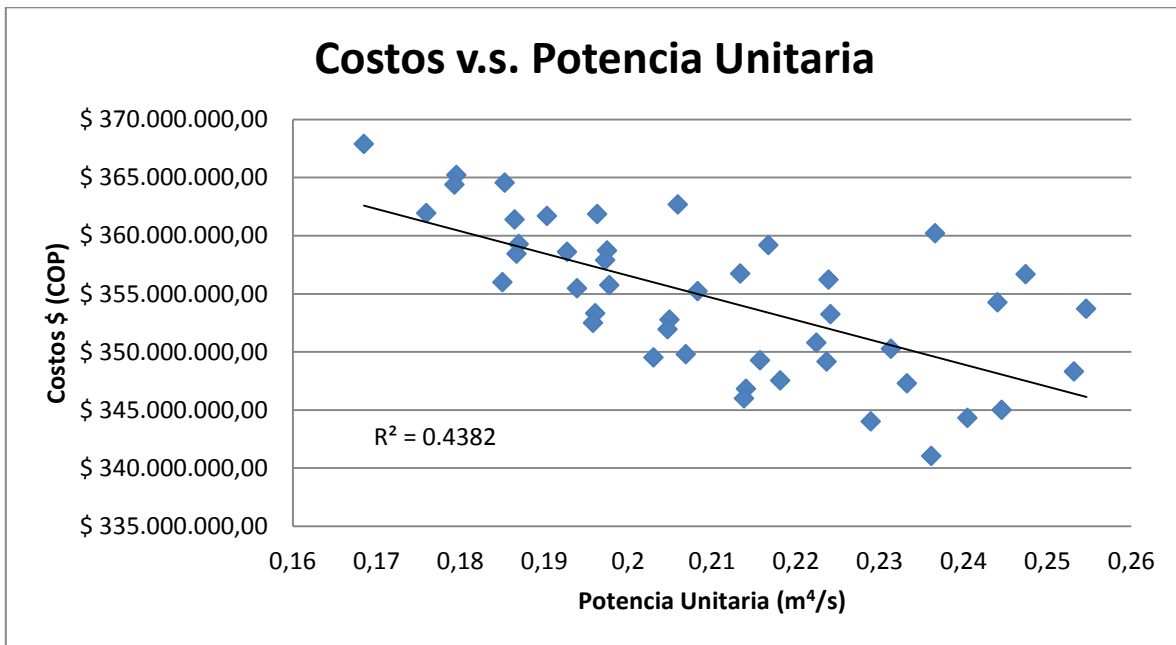


Figura 4.59. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 16.

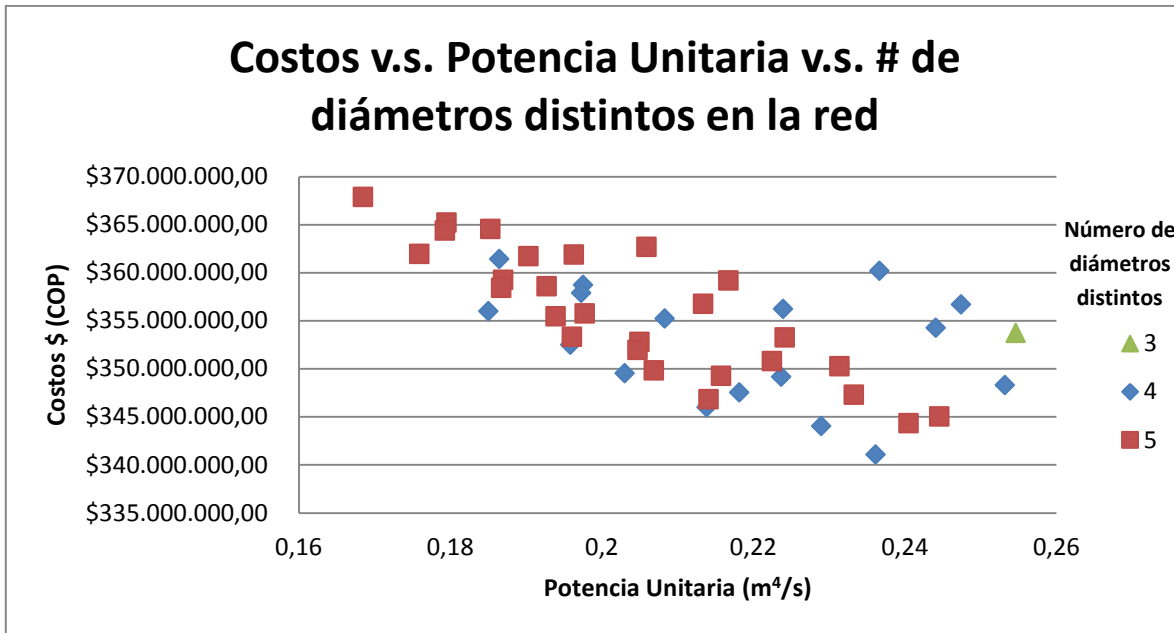


Figura 4.60. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 16.

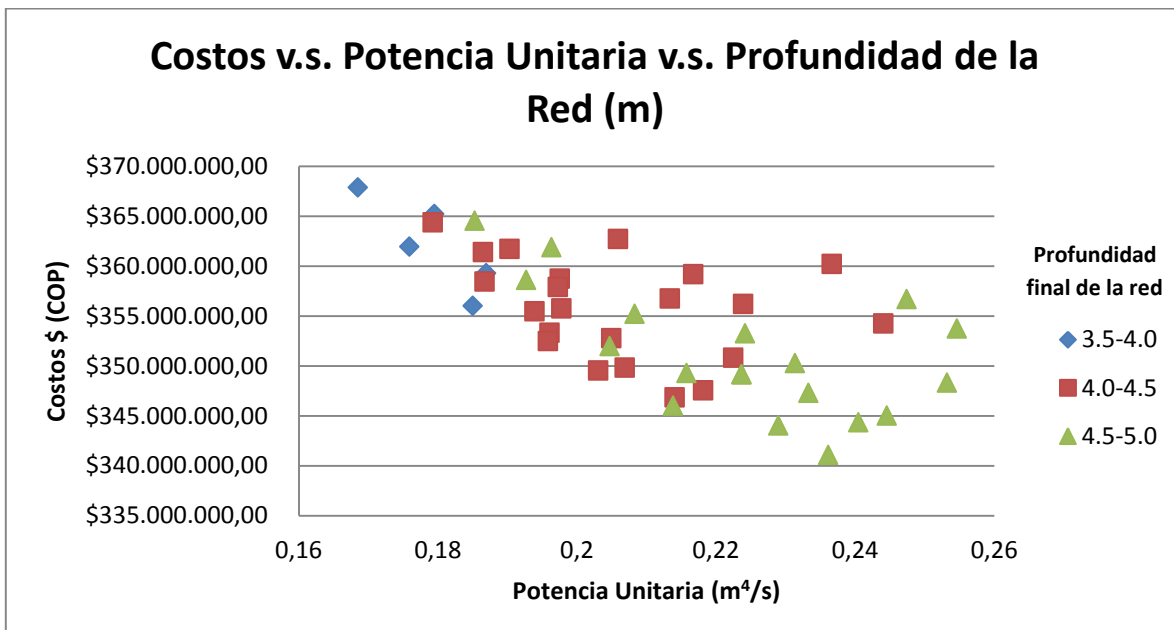


Figura 4.61. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 16.

4.17. Ciudad 17 de 9 tramos

Tabla 4.33. Tramos escogidos para la Ciudad # 17, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
64	4	50	120
124	4	80	120
128	4	82	120
132	4	84	120
136	5	86	120
140	5	88	120
180	5	108	120
220	5	128	120
320,000		Alternativas posibles	
36		Alternativas viables	
14.1 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.34. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 17 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65	
64	1	14	0.05	0.002	120	0.012	\$ 39,240,459.23	
124	2	14	0.08	0.004	120	0.0384	\$ 39,516,780.31	
128	2	14	0.082	0.004	120	0.03936	\$ 39,516,780.31	
132	2	14	0.084	0.004	120	0.04032	\$ 39,516,780.31	
136	3	14	0.086	0.004	120	0.04128	\$ 39,516,780.31	
140	2	18	0.088	0.003	120	0.03168	\$ 45,459,793.74	
180	1	20	0.108	0.002	120	0.02592	\$ 48,136,123.31	
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23	
Cambios de diámetro		4				P.U. total	0.28224	
						Costo total	\$ 367,790,872.38	

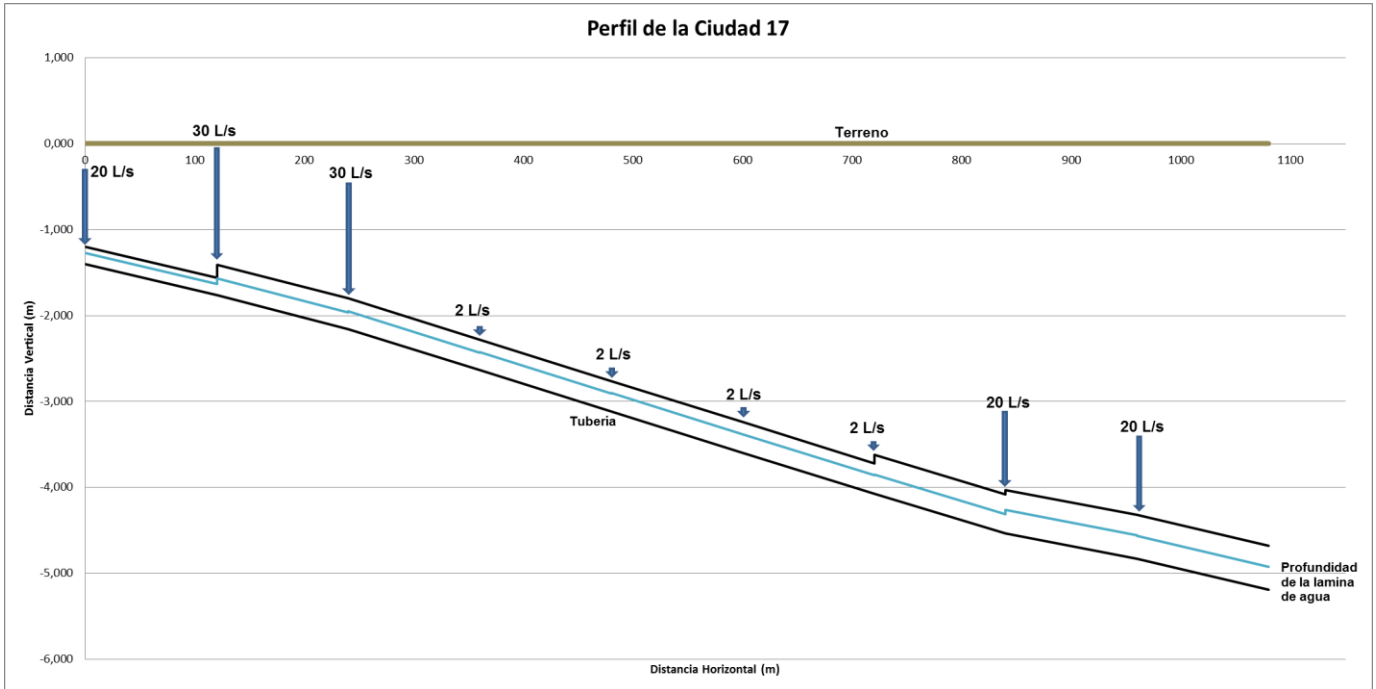


Figura 4.62. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 17.

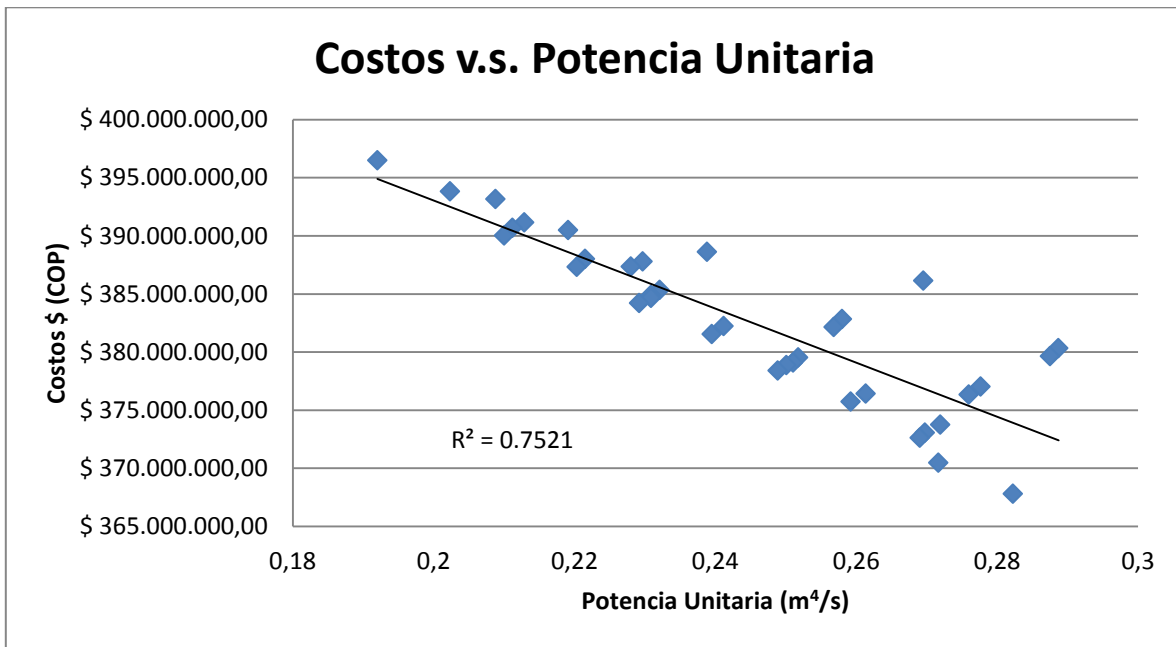


Figura 4.63. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 17.

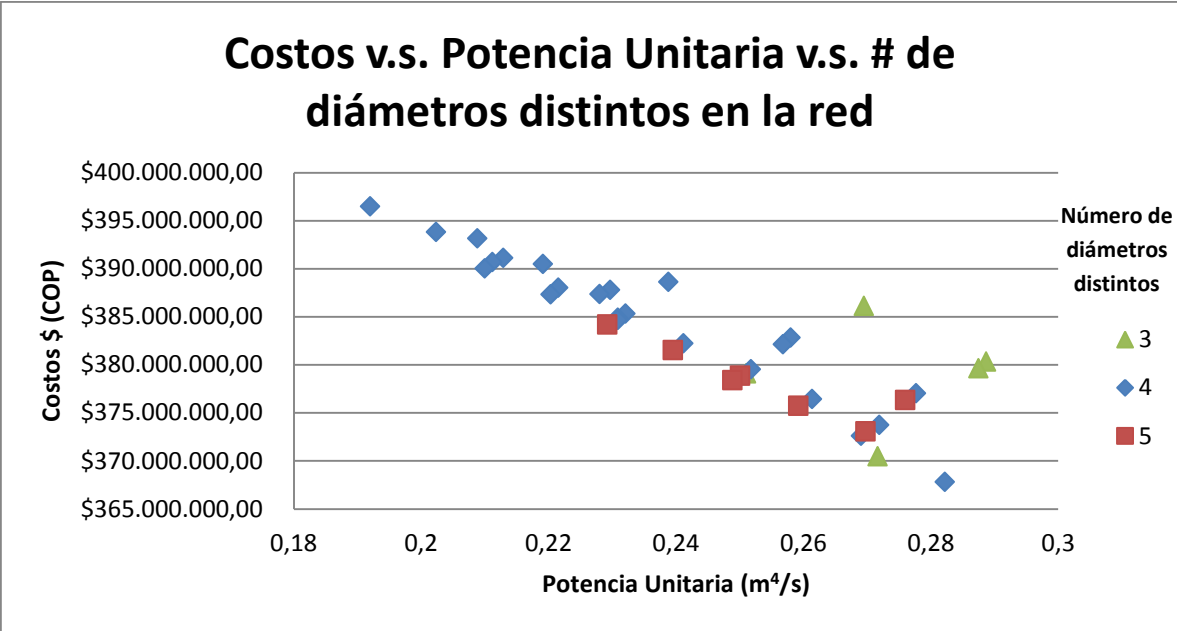


Figura 4.64. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 17.

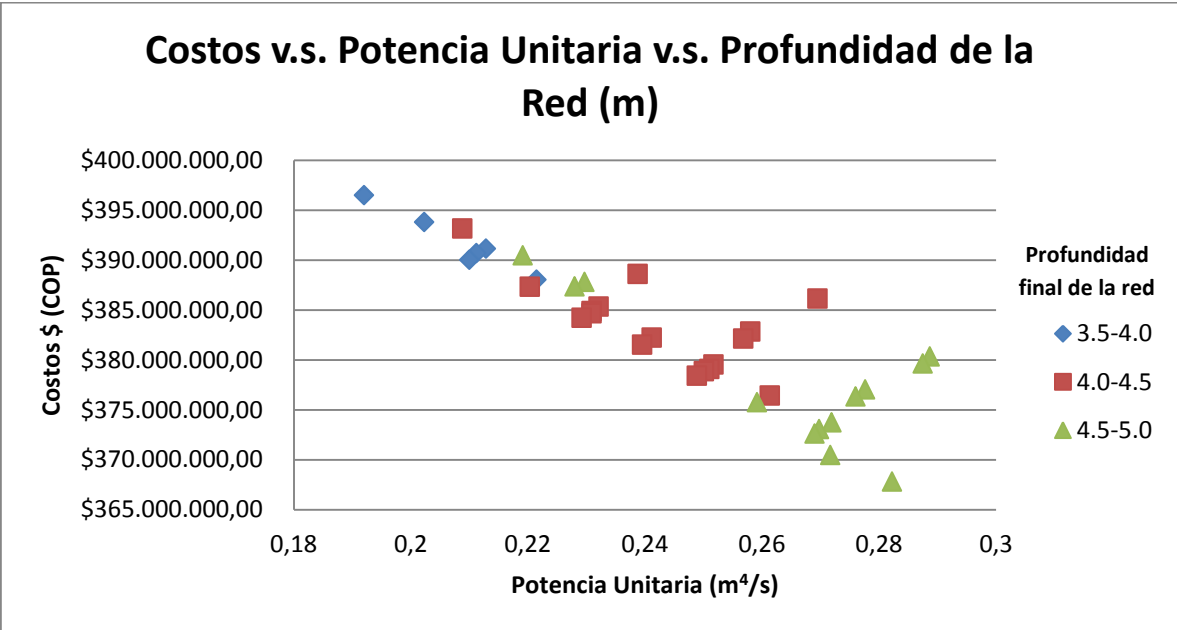


Figura 4.65. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 17.

4.18. Ciudad 18 de 10 tramos

Tabla 4.35. Tramos escogidos para la Ciudad # 18, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
4	2	20	120
16	3	26	120
44	3	40	120
76	4	56	120
84	4	60	120
116	4	76	120
144	5	90	120
160	5	98	120
188	5	112	120
220	5	128	120
720,000		Alternativas posibles	
22		Alternativas viables	
1.29 días		Costo Computacional	

Tabla 4.36. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 18 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
4	1	8	0.02	0.003	120	0.0072	\$ 28,600,729.65
16	1	10	0.026	0.002	120	0.00624	\$ 32,366,614.37
44	1	10	0.04	0.003	120	0.0144	\$ 32,484,826.97
76	1	14	0.056	0.002	120	0.01344	\$ 39,240,459.23
84	1	14	0.06	0.002	120	0.0144	\$ 39,240,459.23
116	2	14	0.076	0.003	120	0.02736	\$ 39,371,373.30
144	3	14	0.09	0.004	120	0.0432	\$ 39,516,780.31
160	2	18	0.098	0.003	120	0.03528	\$ 45,459,793.74
188	2	18	0.112	0.004	120	0.05376	\$ 45,619,640.22
220	1	20	0.128	0.003	120	0.04608	\$ 48,286,645.23
Cambios de diámetro		5				P.U. total	0.26136
						Costo total	\$ 390,187,322.25

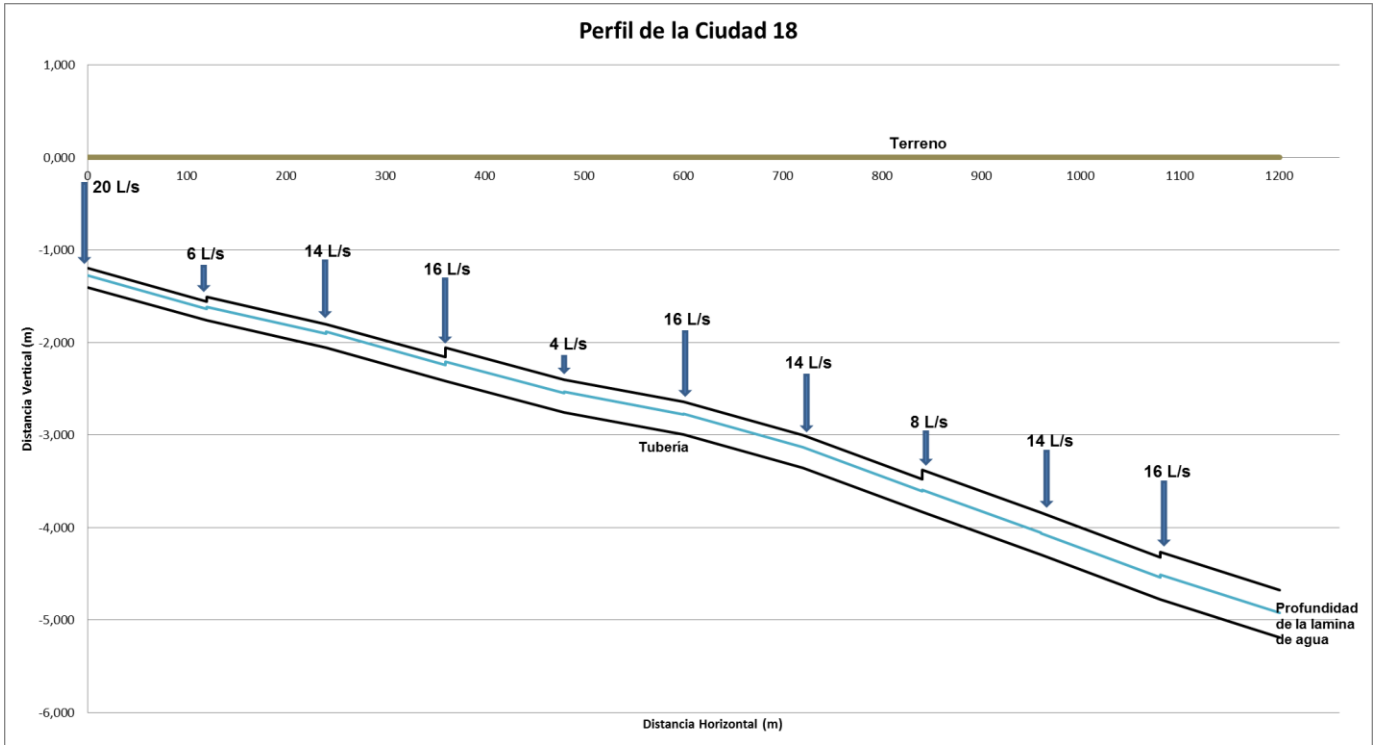


Figura 4.66. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 18.

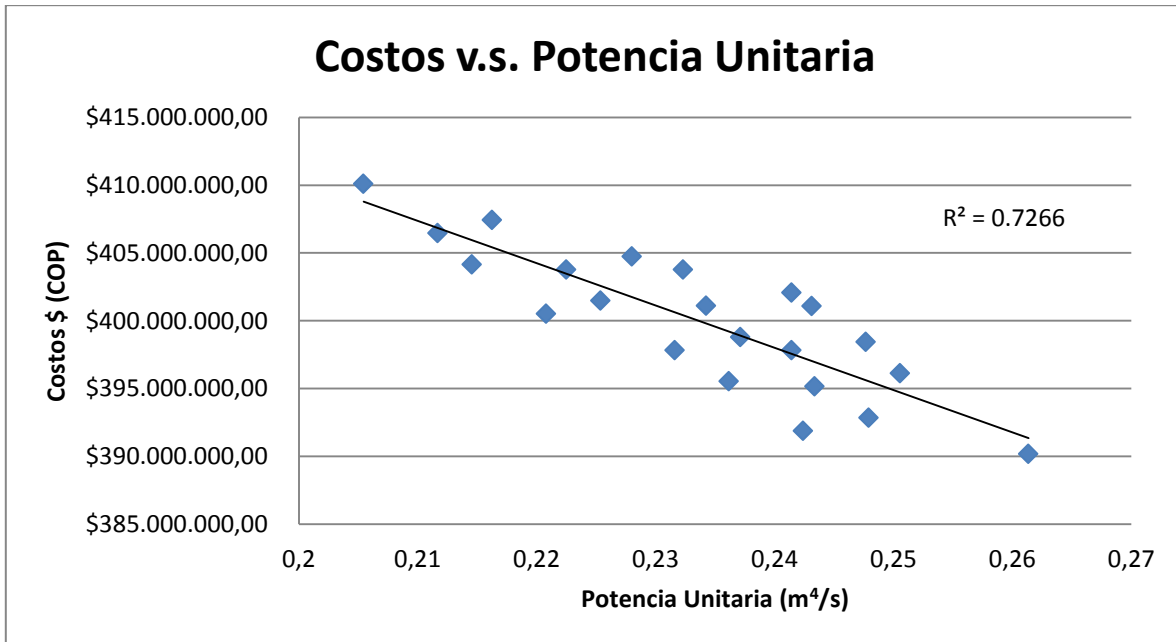


Figura 4.67. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 18.

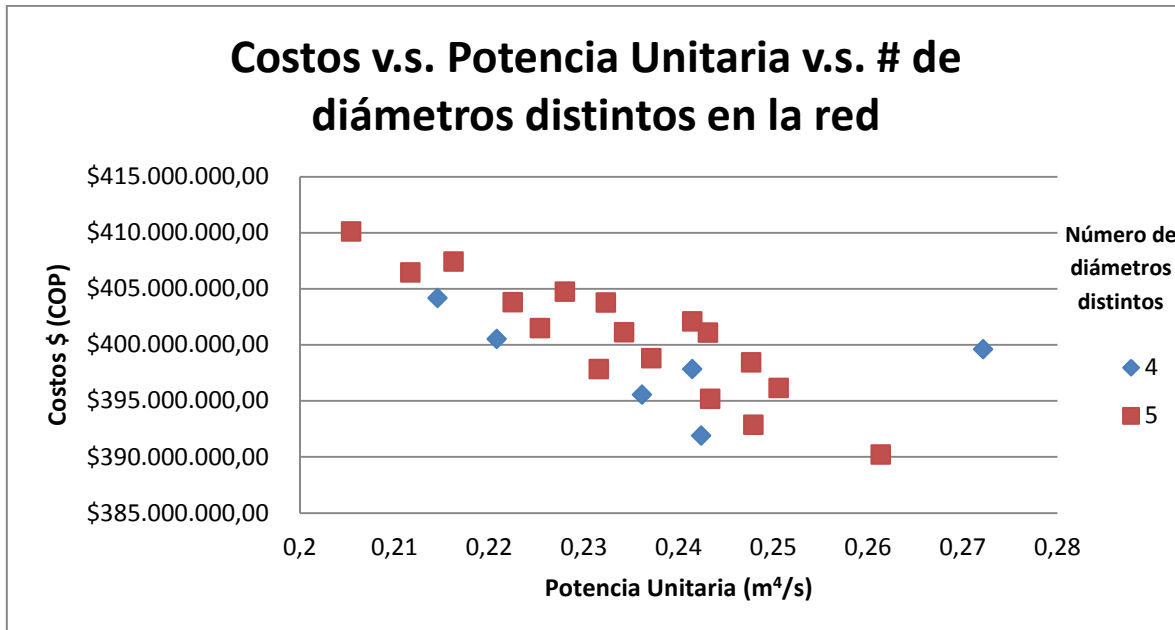


Figura 4.68. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 18.

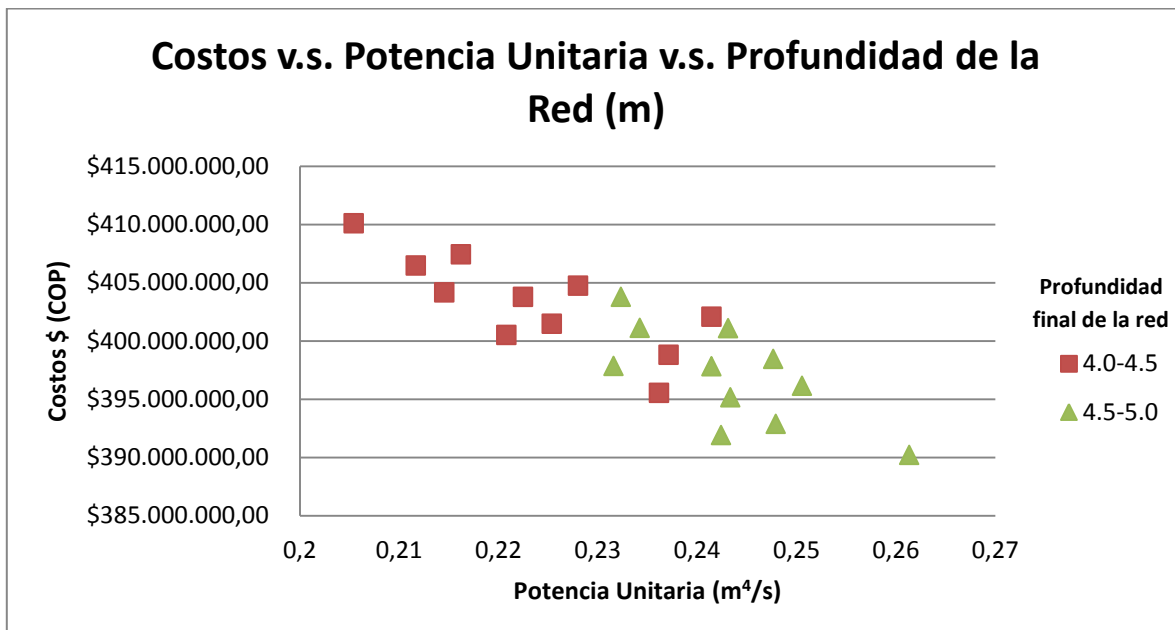


Figura 4.69. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 18.

4.19. Ciudad 19 de 10 tramos

Tabla 4.37. Tramos escogidos para la Ciudad # 19, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
52	4	44	120
56	4	46	120
60	4	48	120
64	4	50	120
68	4	52	120
116	4	76	120
120	4	78	120
124	4	80	120
128	4	82	120
132	4	84	120
1,048,576		Alternativas posibles	
21		Alternativas viables	
1.56 días		Costo Computacional	

Tabla 4.38. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 19 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
52	2	10	0.044	0.004	120	0.02112	\$ 32,616,126.37
56	2	10	0.046	0.004	120	0.02208	\$ 32,616,126.37
60	2	10	0.048	0.004	120	0.02304	\$ 32,616,126.37
64	1	14	0.05	0.002	120	0.012	\$ 39,240,459.23
68	1	14	0.052	0.002	120	0.01248	\$ 39,240,459.23
116	2	14	0.076	0.003	120	0.02736	\$ 39,371,373.30
120	2	14	0.078	0.004	120	0.03744	\$ 39,516,780.31
124	1	18	0.08	0.002	120	0.0192	\$ 45,315,879.40
128	1	18	0.082	0.002	120	0.01968	\$ 45,315,879.40
132	1	18	0.084	0.002	120	0.02016	\$ 45,315,879.40
Cambios de diámetro		3				P.U. total	0.21456
						Costo total	\$ 391,165,089.36

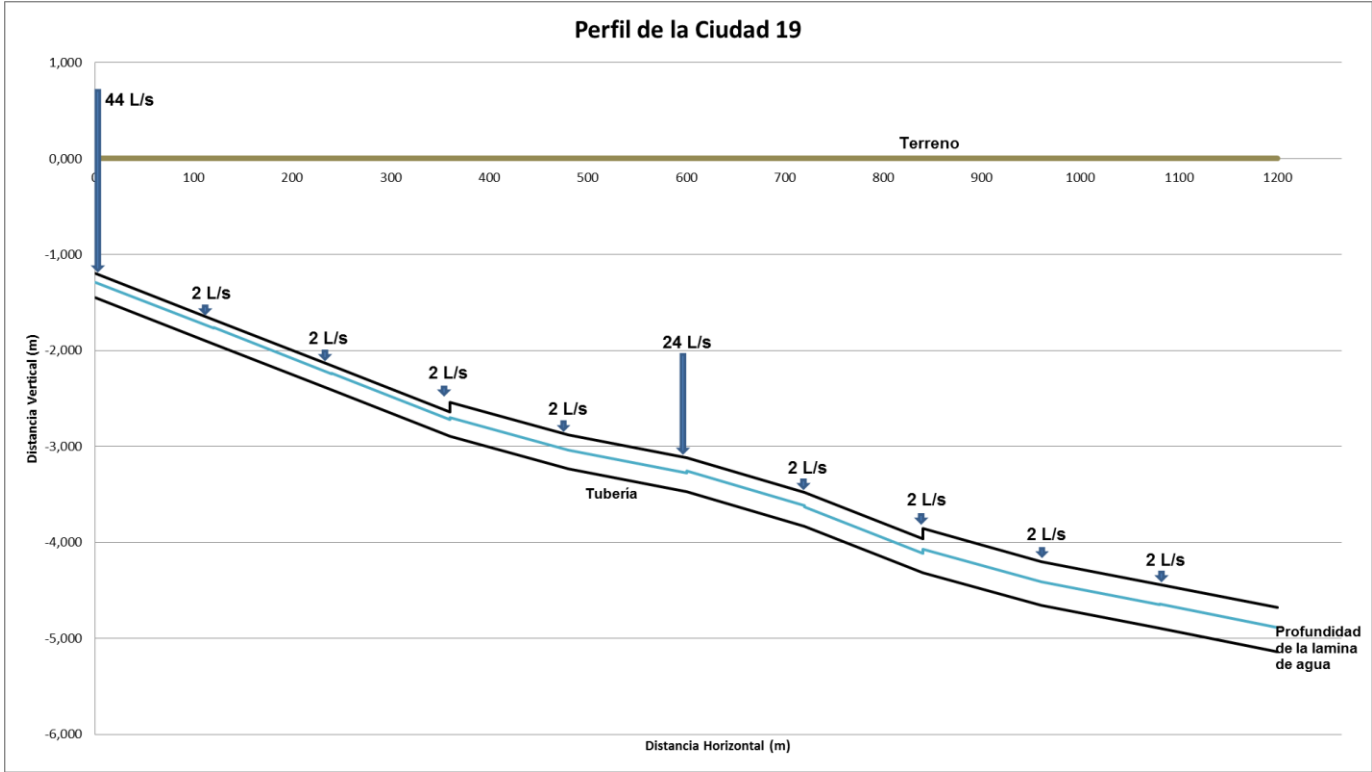


Figura 4.70. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 19.

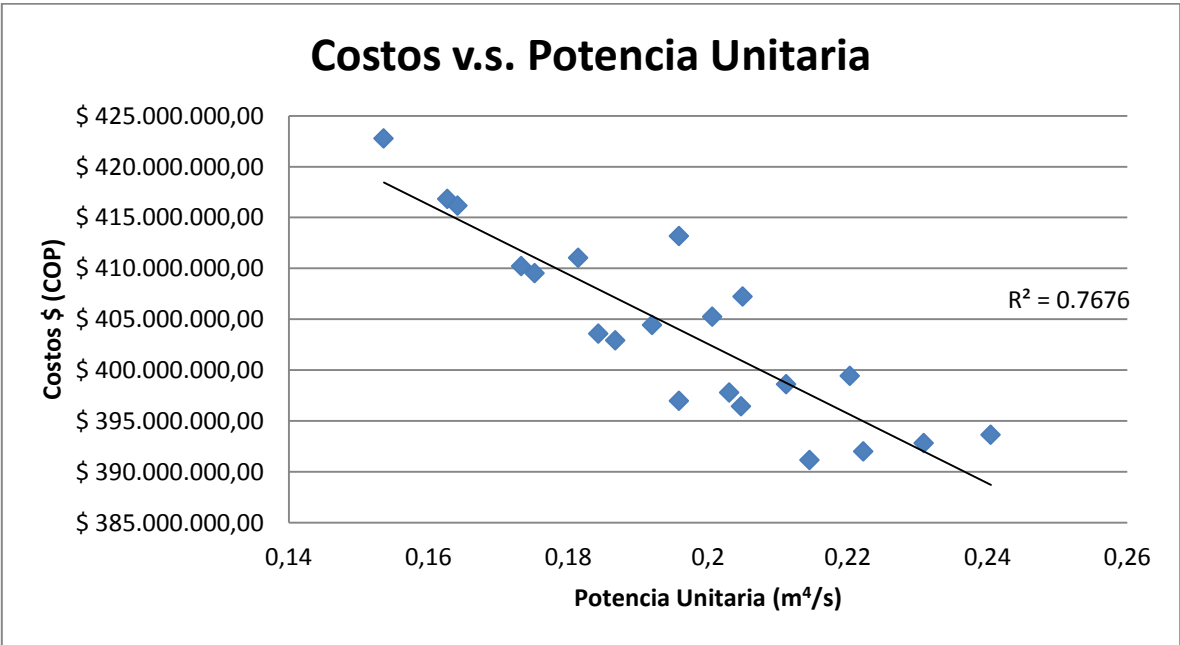


Figura 4.71. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 19.

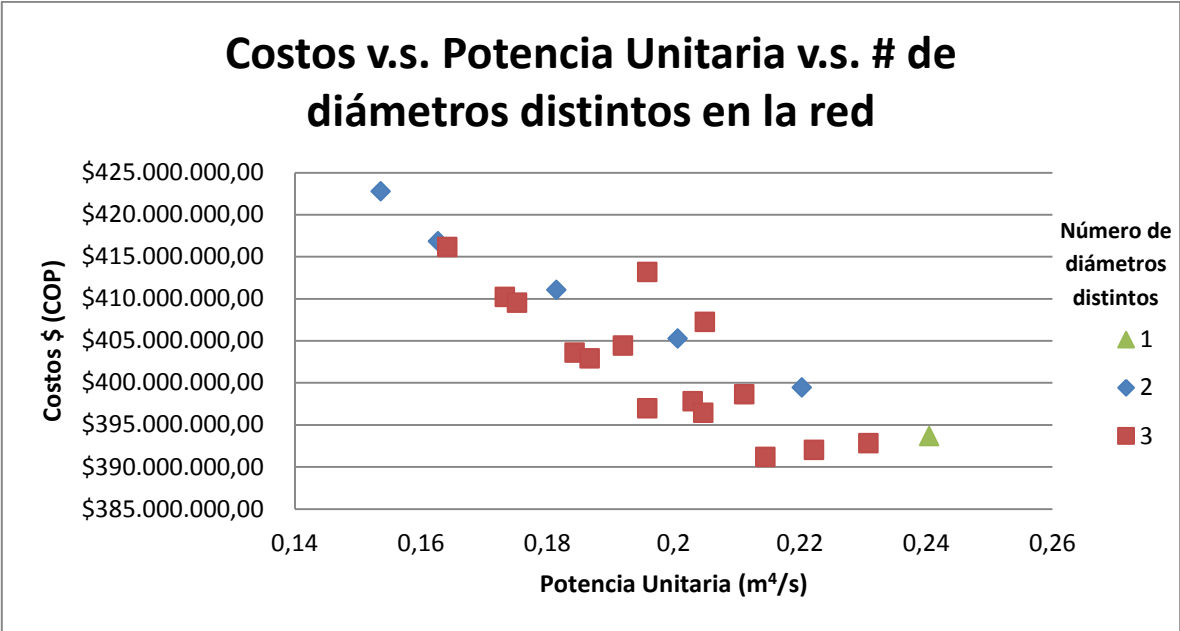


Figura 4.72. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 19.

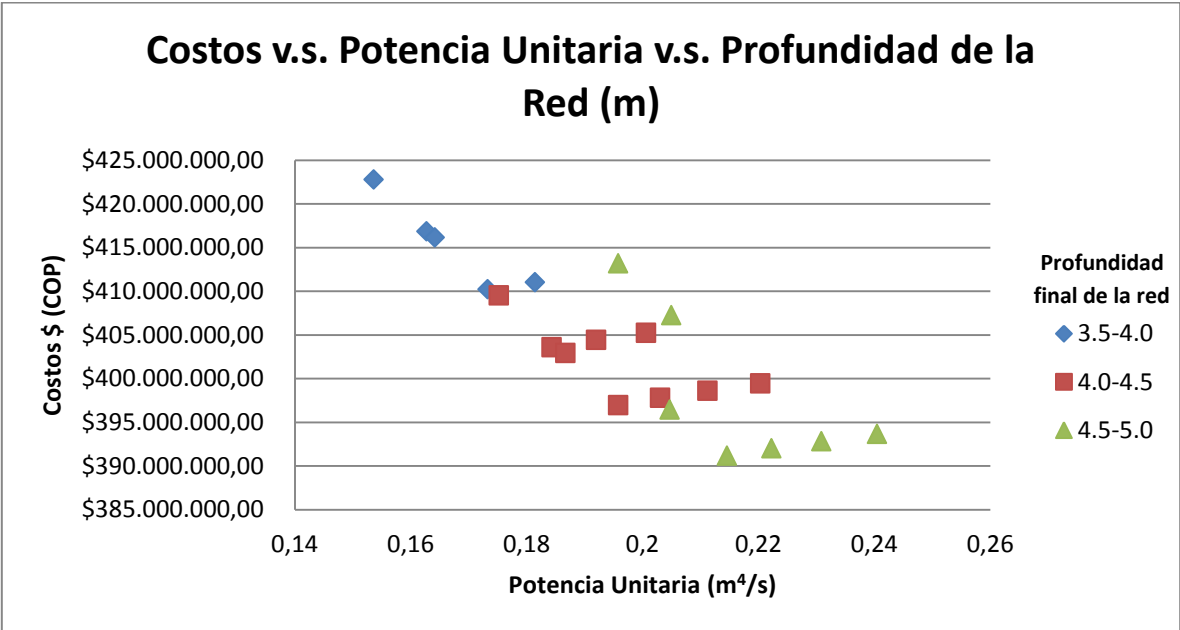


Figura 4.73. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 19.

4.20. Ciudad 20 de 11 tramos

Tabla 4.39. Tramos escogidos para la Ciudad # 20, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
12	3	24	120
20	3	28	120
28	3	32	120
36	3	36	120
44	3	40	120
60	4	48	120
68	4	52	120
84	4	60	120
108	4	72	120
116	4	76	120
132	4	84	120
995,328		Alternativas posibles	
14		Alternativas viables	
1.73 días		Costo Computacional	

Tabla 4.40. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 20 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
12	1	10	0.024	0.002	120	0.00576	\$ 32,366,614.37	
20	1	10	0.028	0.002	120	0.00672	\$ 32,366,614.37	
28	1	10	0.032	0.002	120	0.00768	\$ 32,366,614.37	
36	1	10	0.036	0.003	120	0.01296	\$ 32,484,826.97	
44	1	10	0.04	0.003	120	0.0144	\$ 32,484,826.97	
60	2	10	0.048	0.004	120	0.02304	\$ 32,616,126.37	
68	1	14	0.052	0.002	120	0.01248	\$ 39,240,459.23	
84	1	14	0.06	0.002	120	0.0144	\$ 39,240,459.23	
108	2	14	0.072	0.003	120	0.02592	\$ 39,371,373.30	
116	2	14	0.076	0.003	120	0.02736	\$ 39,371,373.30	
132	1	18	0.084	0.002	120	0.02016	\$ 45,315,879.40	
Cambios de diámetro		3				P.U. total	0.17088	
						Costo total	\$ 397,225,167.86	

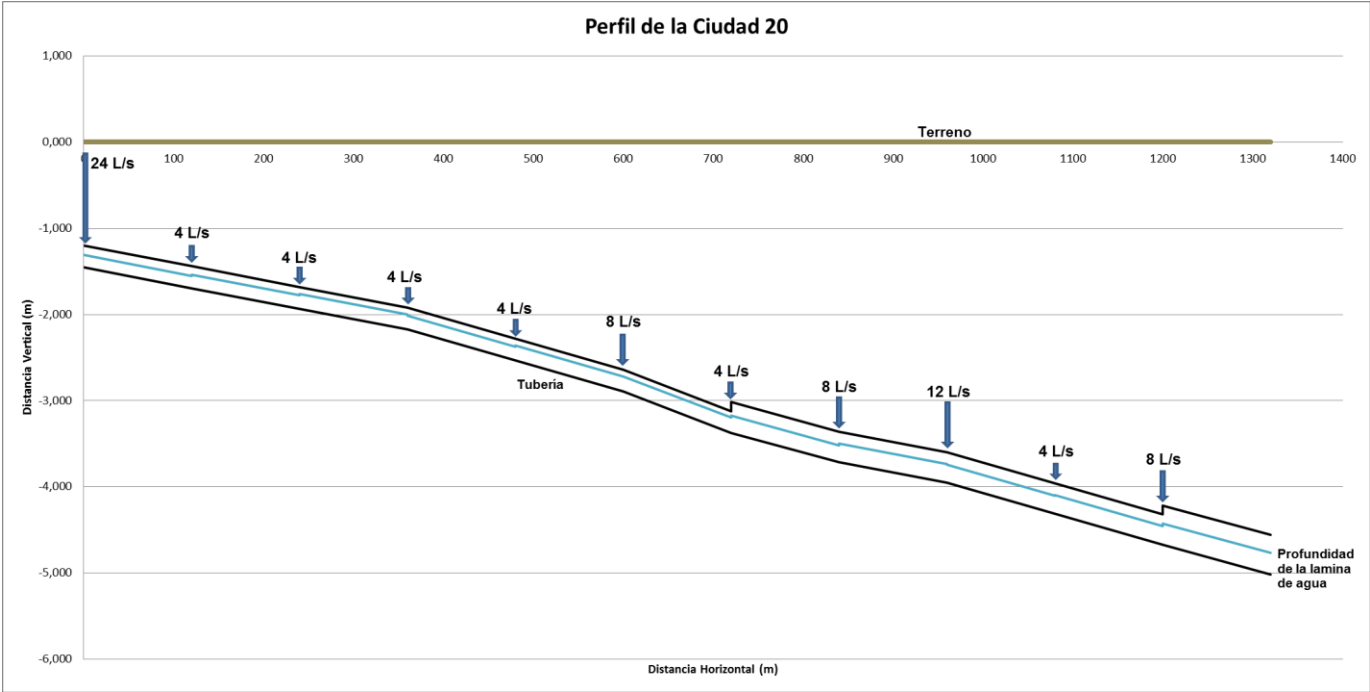


Figura 4.74. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 20.

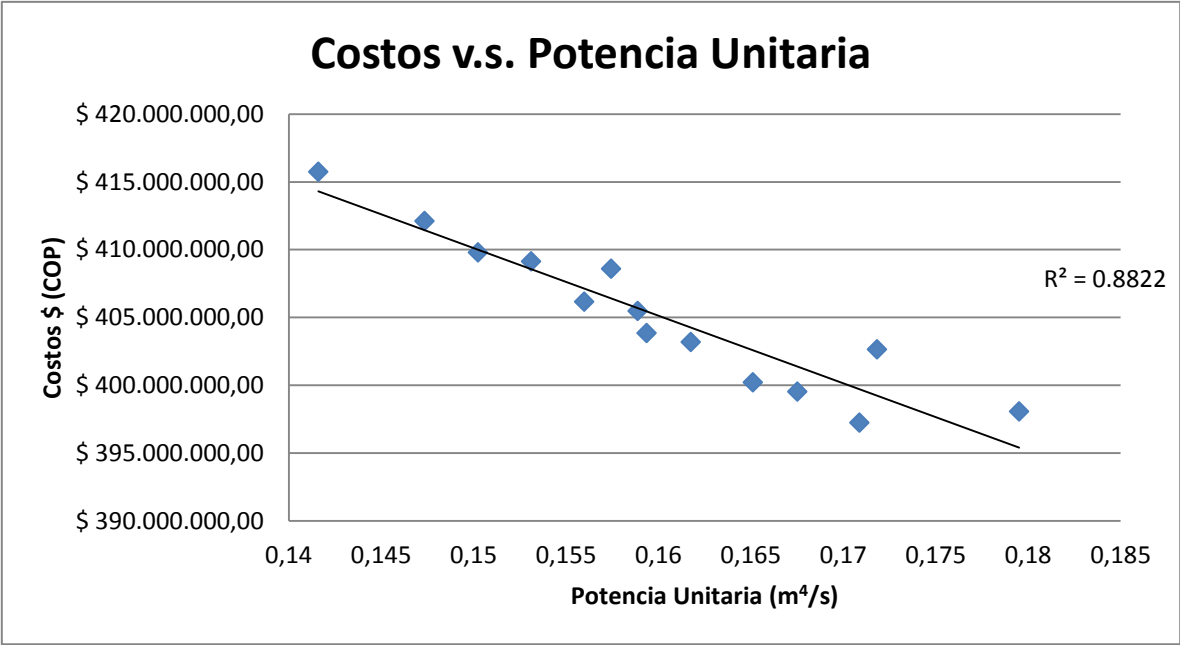


Figura 4.75. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 20.

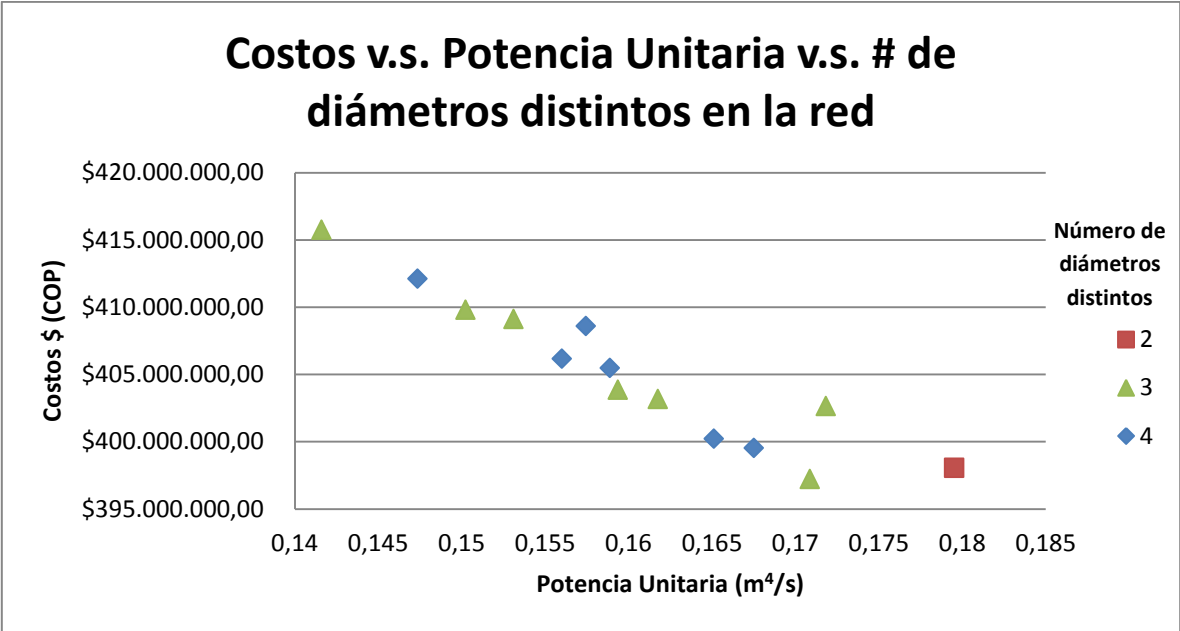


Figura 4.76. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 20.

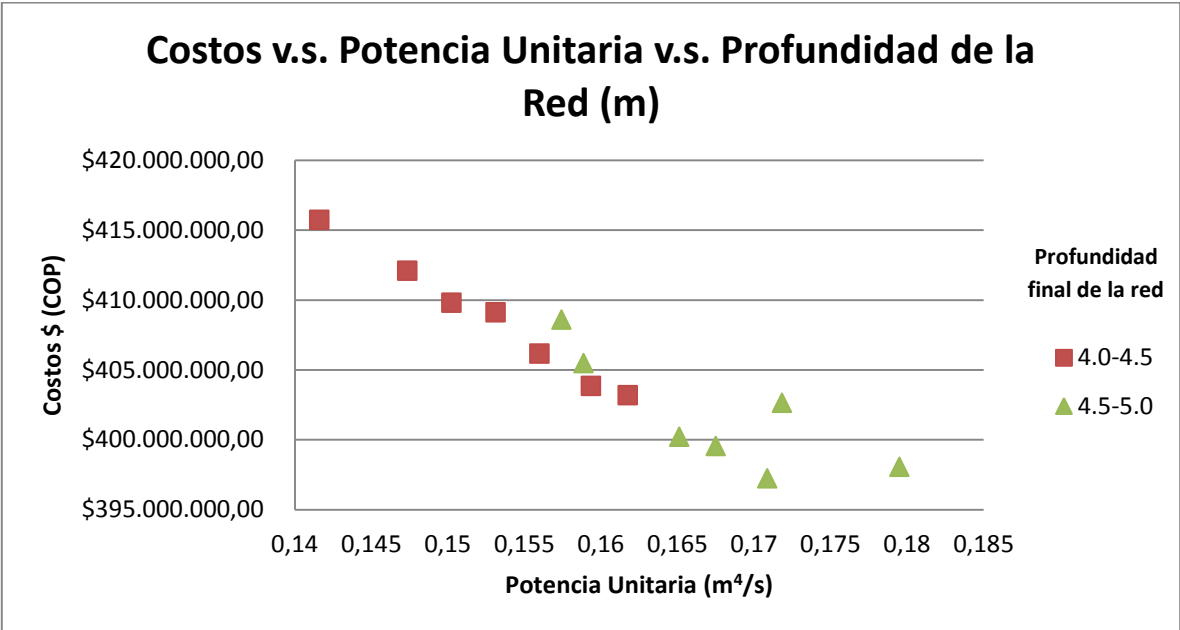


Figura 4.77. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 20.

4.21. Ciudad 21 de 11 tramos

Tabla 4.41. Tramos escogidos para la Ciudad # 21, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
49	4	44	75
57	4	48	75
69	4	54	75
81	4	60	75
105	4	72	75
109	4	74	75
113	4	76	75
117	4	78	75
121	4	80	75
125	4	82	75
129	4	84	75
4,194,304		Alternativas posibles	
85		Alternativas viables	
4.53 días		Costo Computacional	

Tabla 4.42. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 21 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
49	2	10	0.044	0.004	75	0.0132	\$ 20,245,777.81	
57	2	10	0.048	0.004	75	0.0144	\$ 20,245,777.81	
69	2	10	0.054	0.005	75	0.02025	\$ 20,287,217.59	
81	2	10	0.06	0.006	75	0.027	\$ 20,331,322.12	
105	2	14	0.072	0.003	75	0.0162	\$ 24,501,277.64	
109	2	14	0.074	0.003	75	0.01665	\$ 24,501,277.64	
113	2	14	0.076	0.003	75	0.0171	\$ 24,501,277.64	
117	2	14	0.078	0.004	75	0.0234	\$ 24,543,719.16	
121	2	14	0.08	0.004	75	0.024	\$ 24,543,719.16	
125	2	14	0.082	0.004	75	0.0246	\$ 24,543,719.16	
129	2	14	0.084	0.004	75	0.0252	\$ 24,543,719.16	
Cambios de diámetro		2				P.U. total	0.222	
						Costo total	\$ 252,788,804.88	

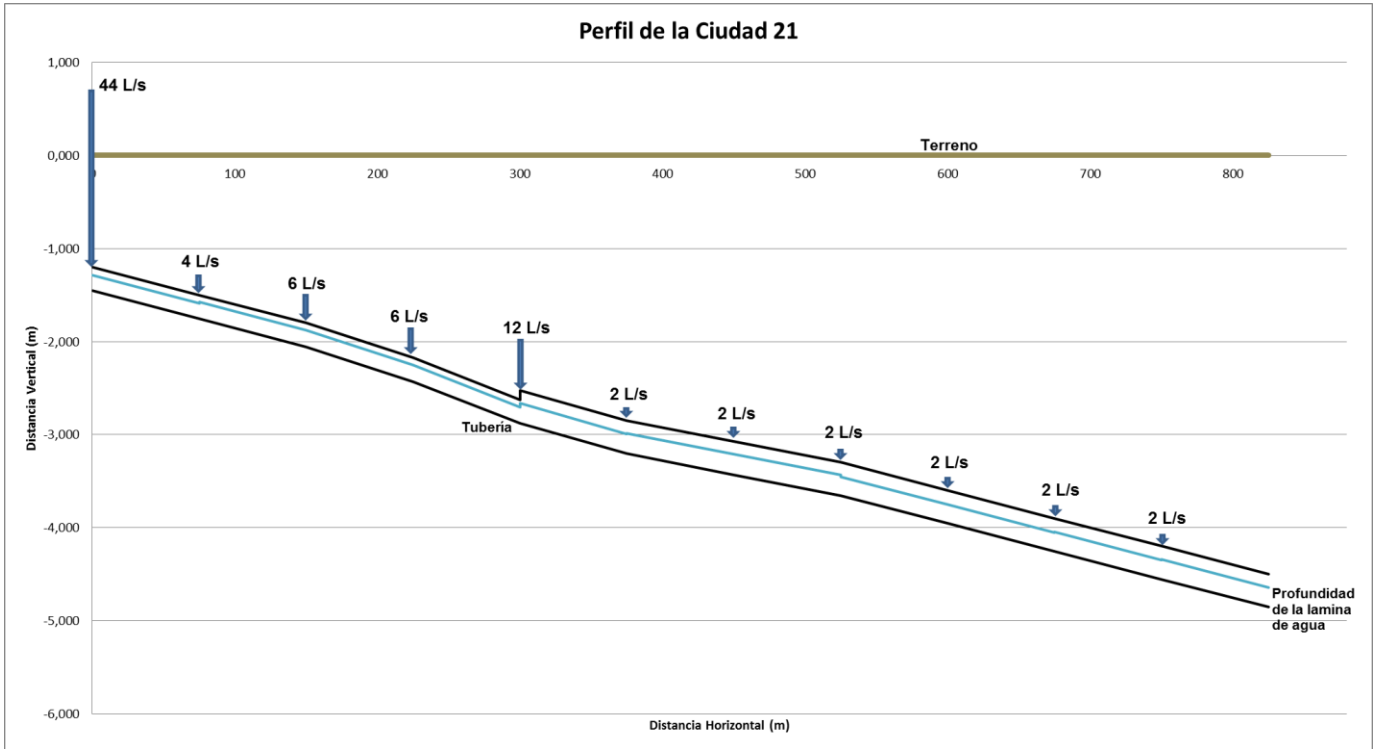


Figura 4.78. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 21.

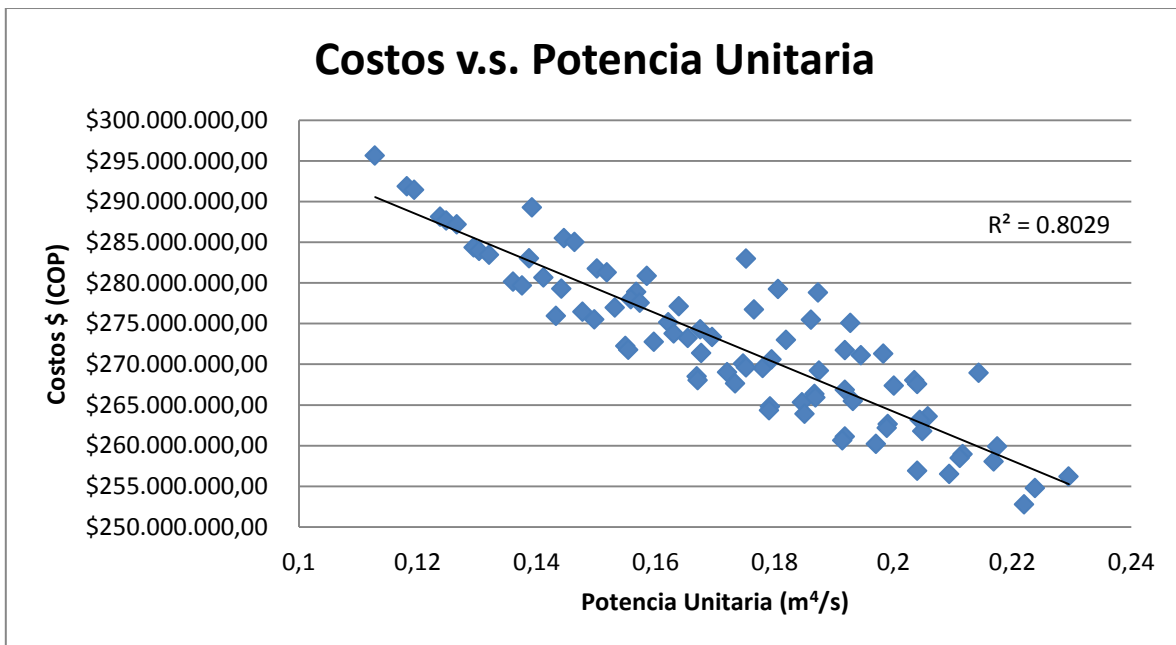


Figura 4.79. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 21.

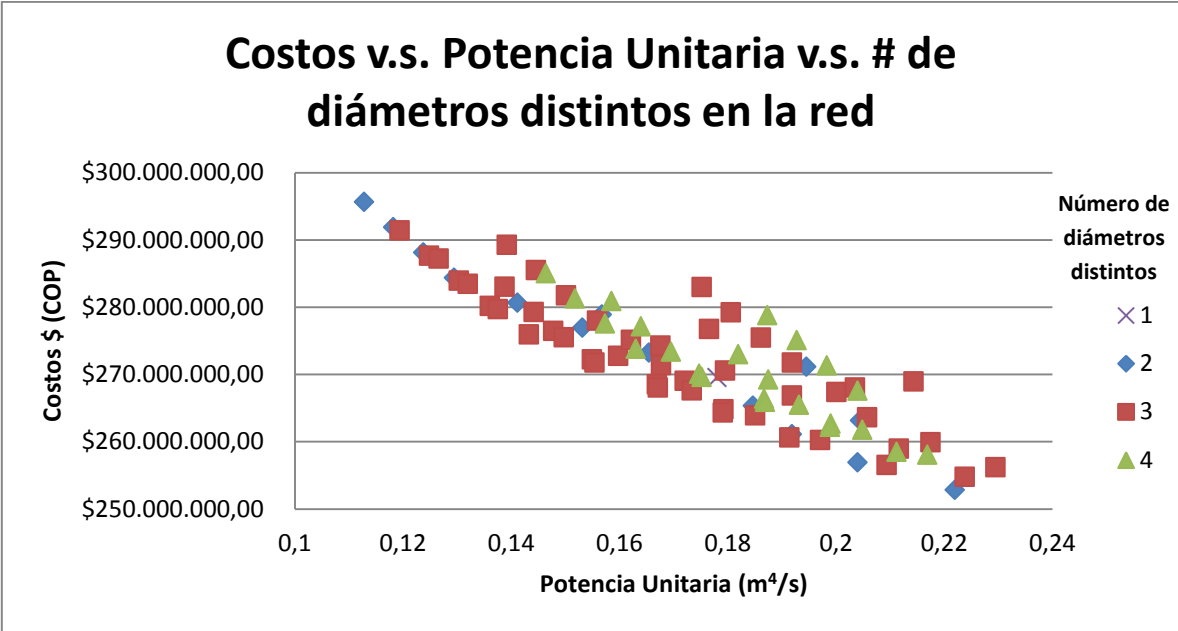


Figura 4.80. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 21.

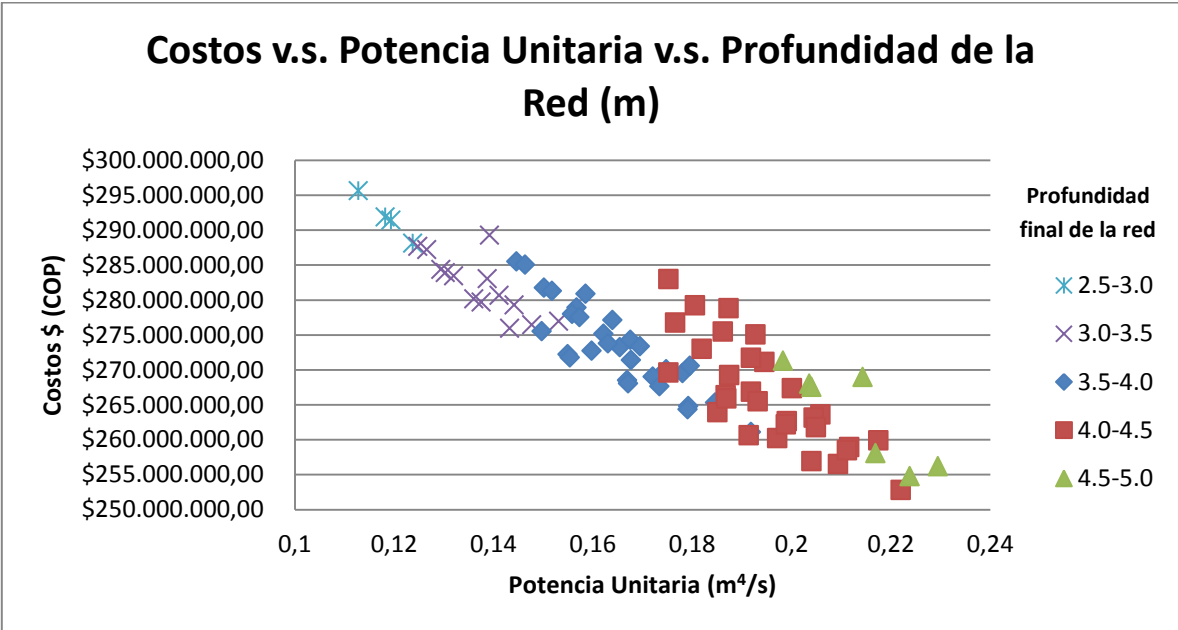


Figura 4.81. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 21.

4.22. Ciudad 22 de 12 tramos

Tabla 4.43. Tramos escogidos para la Ciudad # 22, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
9	3	24	75
13	3	26	75
17	3	28	75
21	3	30	75
25	3	32	75
29	3	34	75
33	3	36	75
37	3	38	75
41	3	40	75
45	3	42	75
49	4	44	75
53	4	46	75
944,784		Alternativas posibles	
22		Alternativas viables	
1.37 días		Costo Computacional	

Tabla 4.44. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 22 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo
9	2	8	0.024	0.004	75	0.0072	\$ 17,821,235.32
13	2	8	0.026	0.004	75	0.0078	\$ 17,821,235.32
17	2	8	0.028	0.005	75	0.0105	\$ 17,860,489.90
21	2	8	0.03	0.005	75	0.01125	\$ 17,860,489.90
25	1	10	0.032	0.002	75	0.0048	\$ 20,172,950.02
29	1	10	0.034	0.003	75	0.00765	\$ 20,207,454.02
33	1	10	0.036	0.003	75	0.0081	\$ 20,207,454.02
37	1	10	0.038	0.003	75	0.00855	\$ 20,207,454.02
41	1	10	0.04	0.003	75	0.009	\$ 20,207,454.02
45	1	10	0.042	0.004	75	0.0126	\$ 20,245,777.81
49	2	10	0.044	0.004	75	0.0132	\$ 20,245,777.81
53	2	10	0.046	0.004	75	0.0138	\$ 20,245,777.81
Cambios de diámetro		2			P.U. total	0.11445	
						Costo total	\$ 233,103,549.97

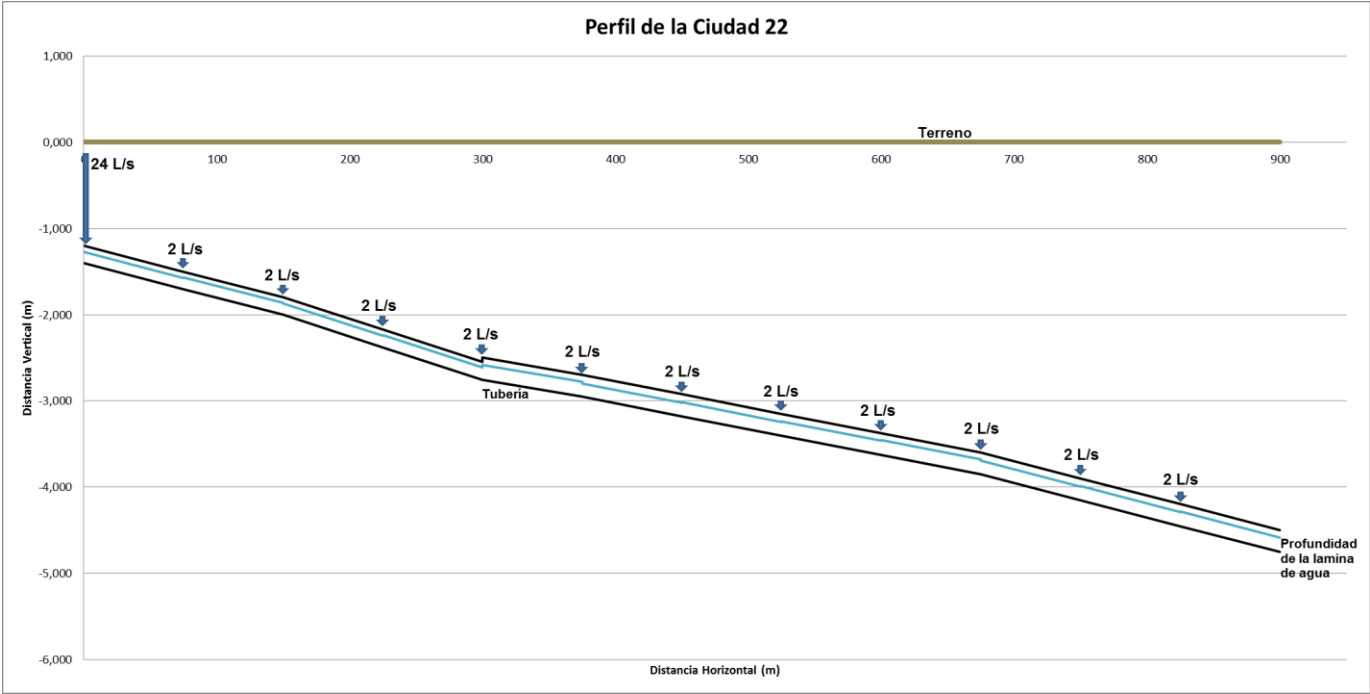


Figura 4.82. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 22.

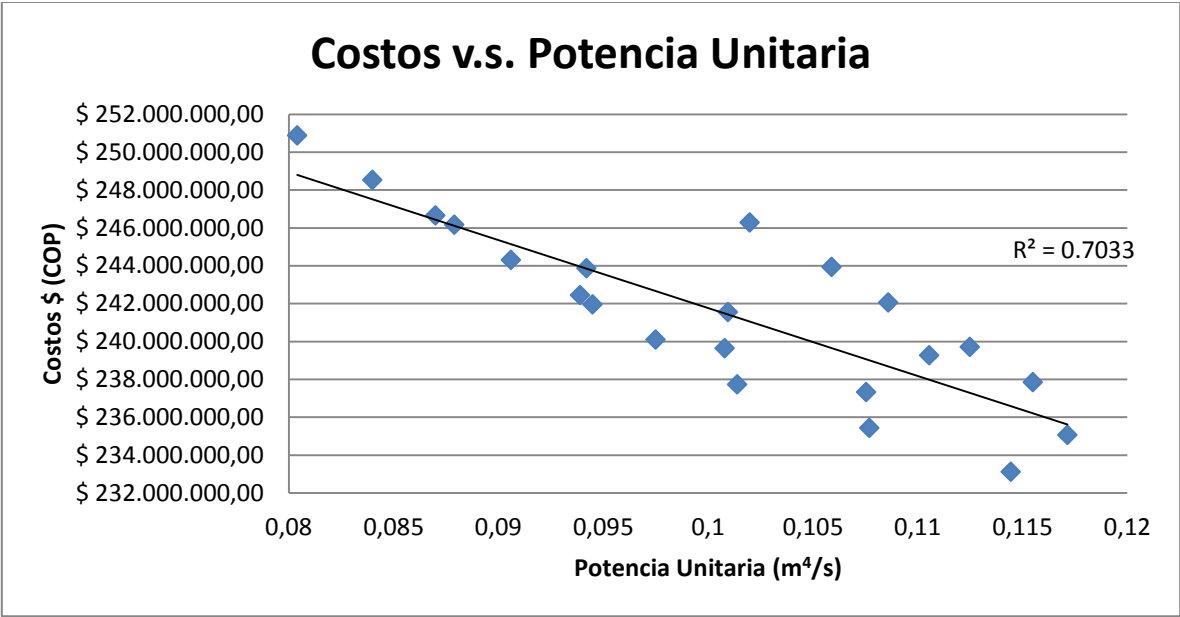


Figura 4.83. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 22.

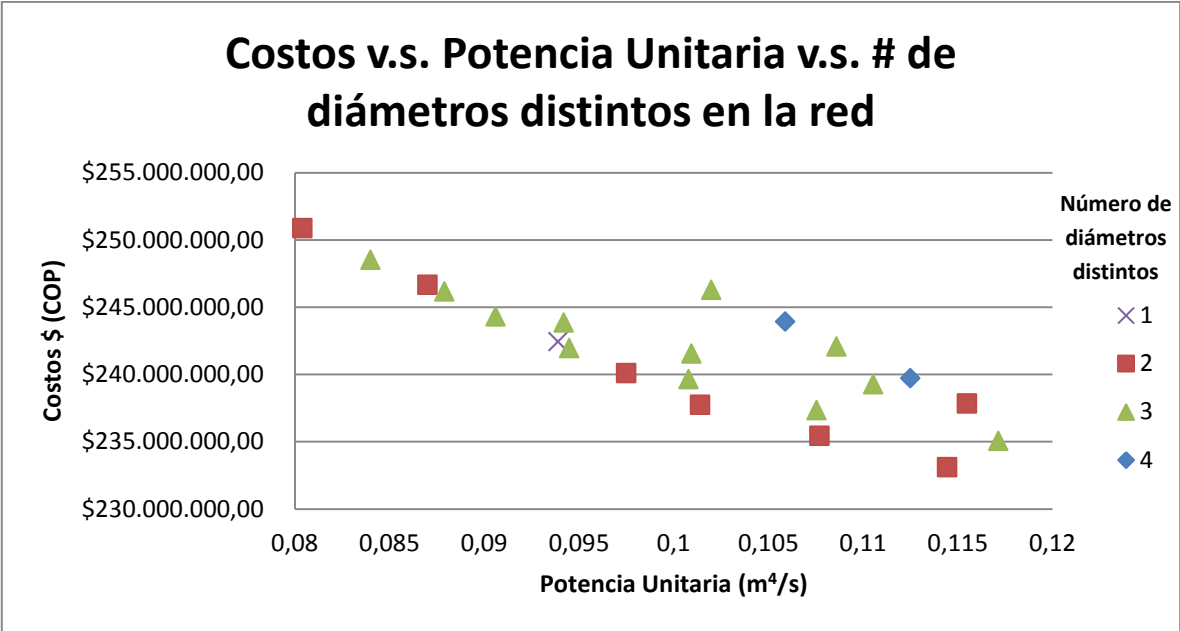


Figura 4.84. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 22.

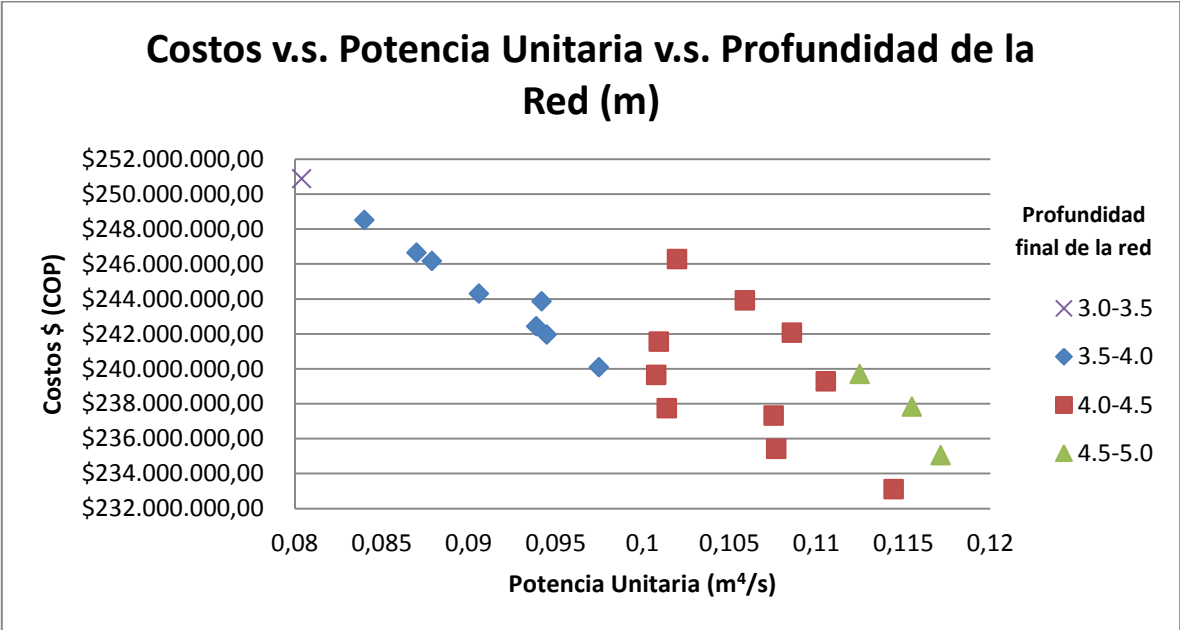


Figura 4.85. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la profundidad de toda la red para la Ciudad # 22.

4.23. Análisis de resultados

Todas las 22 ciudades anteriores muestran una tendencia descendiente en los costos a medida que se aumenta la potencia unitaria; de igual forma muestran una tendencia clara en la disminución de costos cuando las redes presentan mayores profundidades. Por consiguiente, se puede deducir que son dos variables importantes al momento de realizar un diseño óptimo de alcantarillado, es decir, que son significativas. Debido a esto y a las tendencias observadas en los resultados, se podrá realizar un ajuste a las gráficas teniendo como variable dependiente el costo y variables independientes, la potencia unitaria y la profundidad, como se observará en el Apartado 4.28.

Por otra parte, no se evidencia una tendencia clara en las gráficas que representan la cantidad de diámetros usados a lo largo de la red, pero observando la ecuación de costos y las mismas gráficas, se puede deducir que a menor variación de diámetros a lo largo de la red, se mantendrán los menores diámetros posibles de diseño, y por consiguiente los menores costos, confirmando la optimización que se está realizando mediante la metodología utilizada.

De esta manera, la solución óptima se presentará con seguridad a una potencia unitaria alta, una mayor profundidad de construcción y con los diámetros más pequeños posibles que favorecerán la homogeneidad de los perfiles hidráulicos y por tanto de los diámetros a lo largo de la red, observándose una morfología más uniforme. Adicionalmente, la capacidad de la tubería estará en el máximo que le es posible, como se observa en los perfiles de cada ciudad. Afirmando que los costos son optimizados tanto en la construcción como en la operación de las redes.

4.24. Ciudad 23 de 9 tramos con pendiente de 1%

Hasta el momento, únicamente se han desarrollado ciudades planas (terrenos sin pendiente). Y para acercarse un poco más a la realidad, ahora se supondrá una pendiente constante, lo cual implica un cambio en el algoritmo que se venía utilizando.

La manera en que se creó el algoritmo, tuvo como base la Figura 4.86. Esta figura es un ejemplo para poder entender la creación del algoritmo que se encuentra en la Figura 4.87. El ejemplo consta de 3 tramos donde la variable a será constante con un valor de 1.2 metros por la norma RAS; La suma de las variables Q , W , E , se designará como “Longitud”, que son las proyecciones horizontales de cada uno de los tramos; la suma de las variables z , y , x , se designarán como “Altura”, que son las proyecciones verticales de cada uno de los tramos; por último, las variables b , c , d , son las distancias verticales desde la cota cero hasta el terreno donde termina cada tramo, para finalmente obtener las Ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

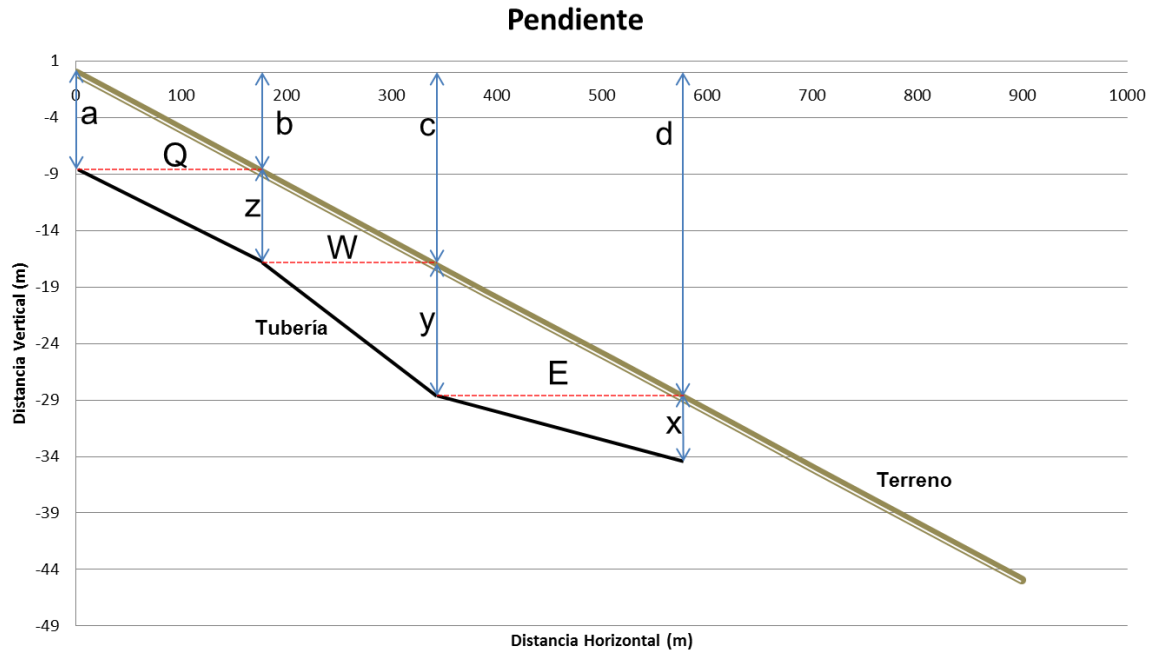


Figura 4.86. Vista perfil de una distribución de 3 tuberías para un terreno con pendiente.

$$5 m \geq a \geq 1.2 m \quad (4.1)$$

$$5 m \geq a + z - b \geq 1.2 m \quad (4.2)$$

$$5 m \geq a + z + y - c \geq 1.2 m \quad (4.3)$$

$$5 m \geq a + z + y + x - d \geq 1.2 m \quad (4.4)$$

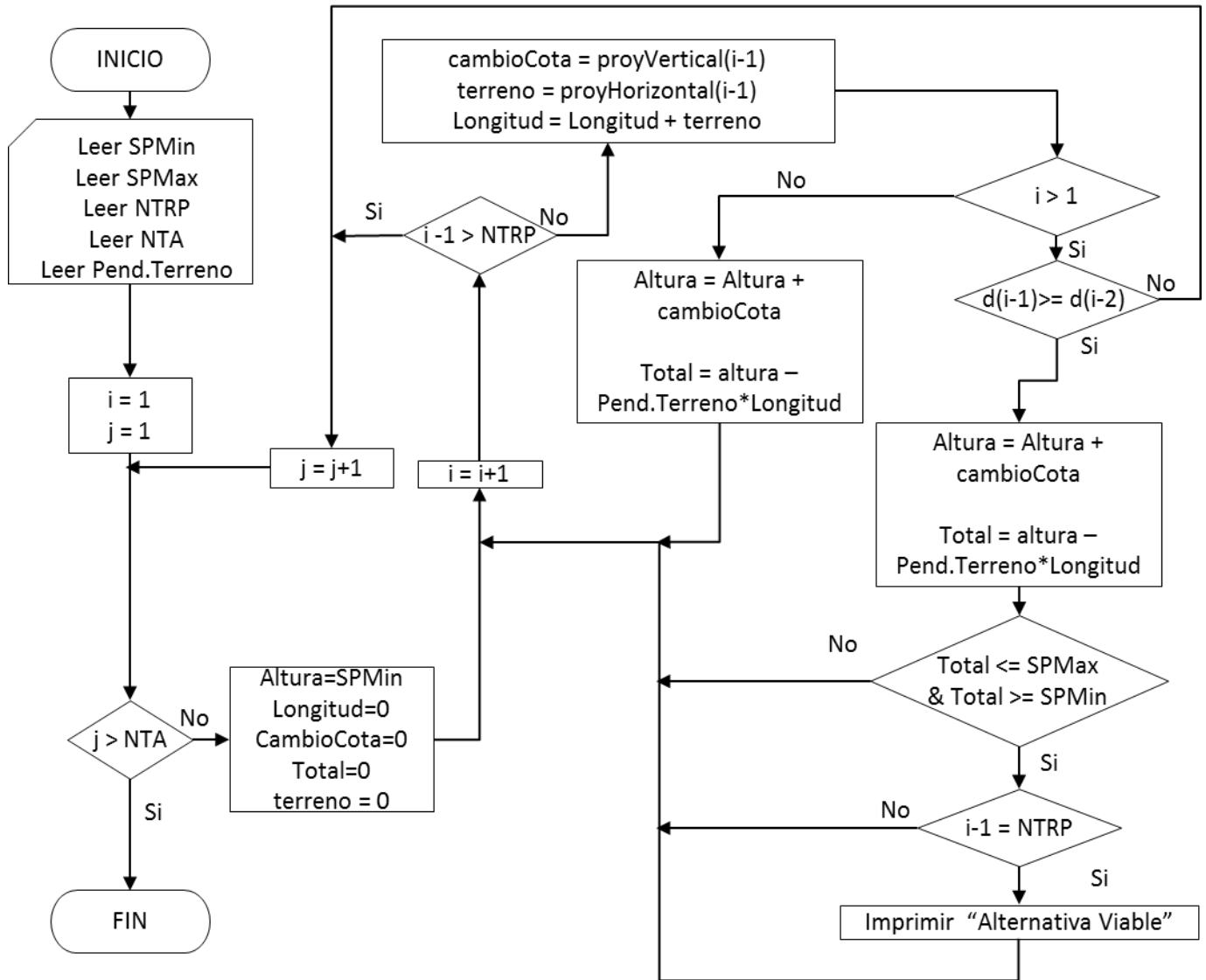


Figura 4.87. Algoritmo de poda para ciudades que presentan pendiente.

donde:

NTA: Número total de alternativas [-]

SPMax: Suma de Proyecciones Máxima = 5 m

SPMin: Suma de Proyecciones Mínima = 1.2 m

NTRP: Número de Tramos de la Rama Principal [-]

ProyVectical(i): Proyección vertical del tramo i [m] = $L(i) * \sin(\text{atan}(S_o(i)))$

ProyHorizontal(i): Es la proyección horizontal del tramo i [m] = $L(i) * \cos(\text{atan}(S_o(i)))$

L(i): Longitud del tramo i [m]

S_o(i): Pendiente del tramo i [-]


Tabla 4.45. Tramos escogidos para la Ciudad # 23, y sus características.

# Tramo	# Total de pendientes lógicas	Caudal (L/s)	Longitud (m)
1	2	20	75
21	3	30	75
41	3	40	75
66	4	52	90
82	4	60	90
105	4	72	75
129	4	84	75
153	5	96	75
179	5	108	105
115,200		Alternativas posibles	
115		Alternativas viables	
4.8 horas		Costo Computacional	

Tabla 4.46. Alternativa menos costosa de la Ciudad # 23 (Solución óptima).

# Diseño (de 220)	# Pendiente Lógica	Diámetro (pulg)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente	Longitud (m)	Potencia Unitaria (m ⁴ /s)	Costo	
1	2	6	0.02	0.01	75	0.015	\$ 15,374,695.91	
21	3	6	0.03	0.021	75	0.04725	\$ 15,970,477.07	
41	2	8	0.04	0.009	75	0.027	\$ 18,040,084.05	
66	3	8	0.052	0.014	90	0.06552	\$ 22,208,605.65	
82	3	8	0.06	0.018	90	0.0972	\$ 22,583,400.45	
105	3	10	0.072	0.009	75	0.0486	\$ 20,476,809.34	
129	3	10	0.084	0.011	75	0.0693	\$ 20,582,947.83	
153	4	10	0.096	0.014	75	0.1008	\$ 20,753,499.49	
179	4	10	0.108	0.018	105	0.20412	\$ 30,286,453.17	
Cambios de diámetro		3				P.U. total	0.67479	
						Costo total	\$ 186,276,972.96	

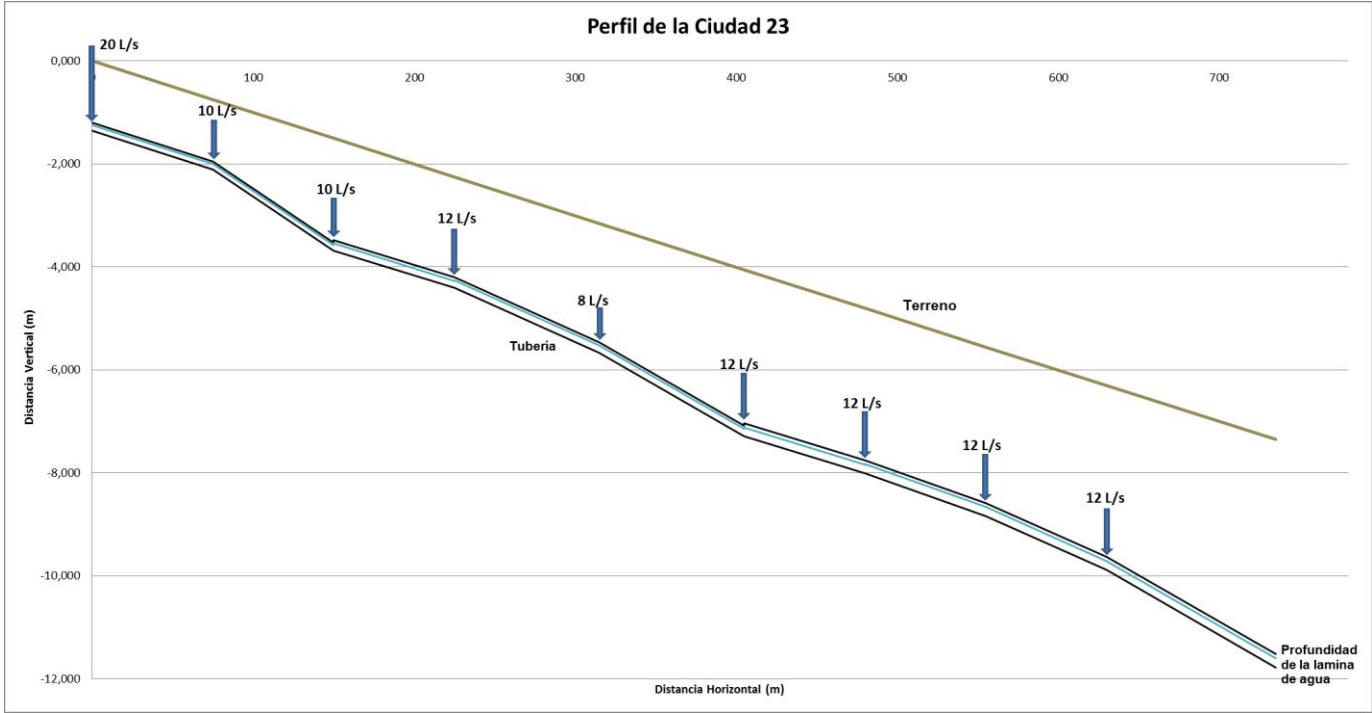


Figura 4.88. Perfil o gradiente hidráulico de la Ciudad # 23.

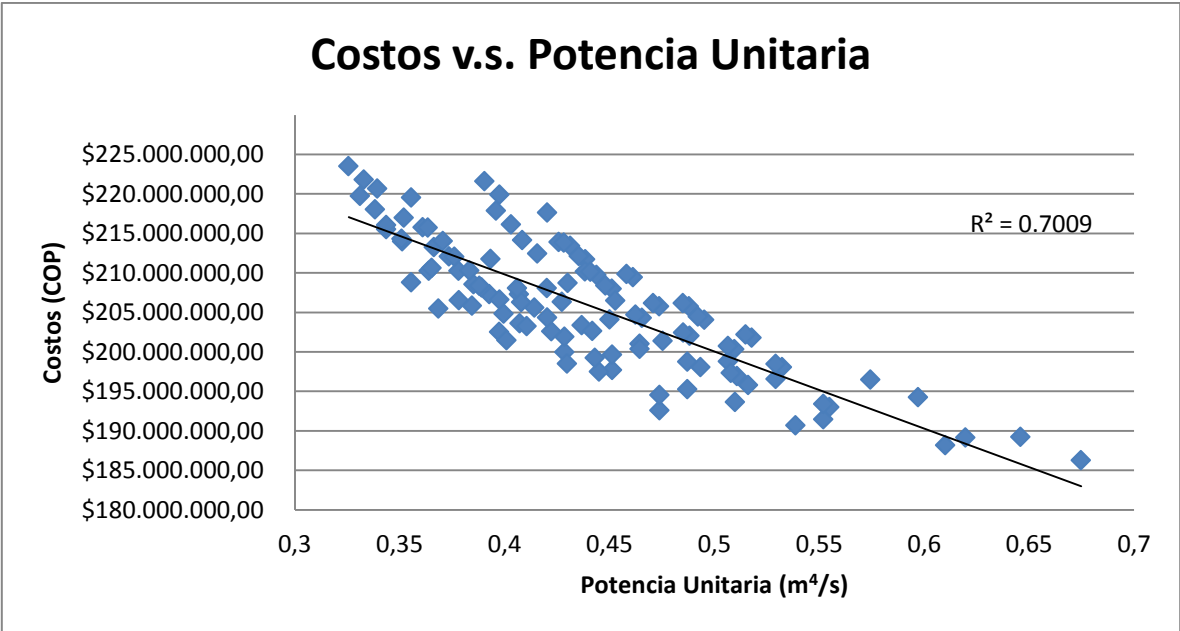


Figura 4.89. Relación entre costos constructivos y potencia unitaria para la Ciudad # 23.

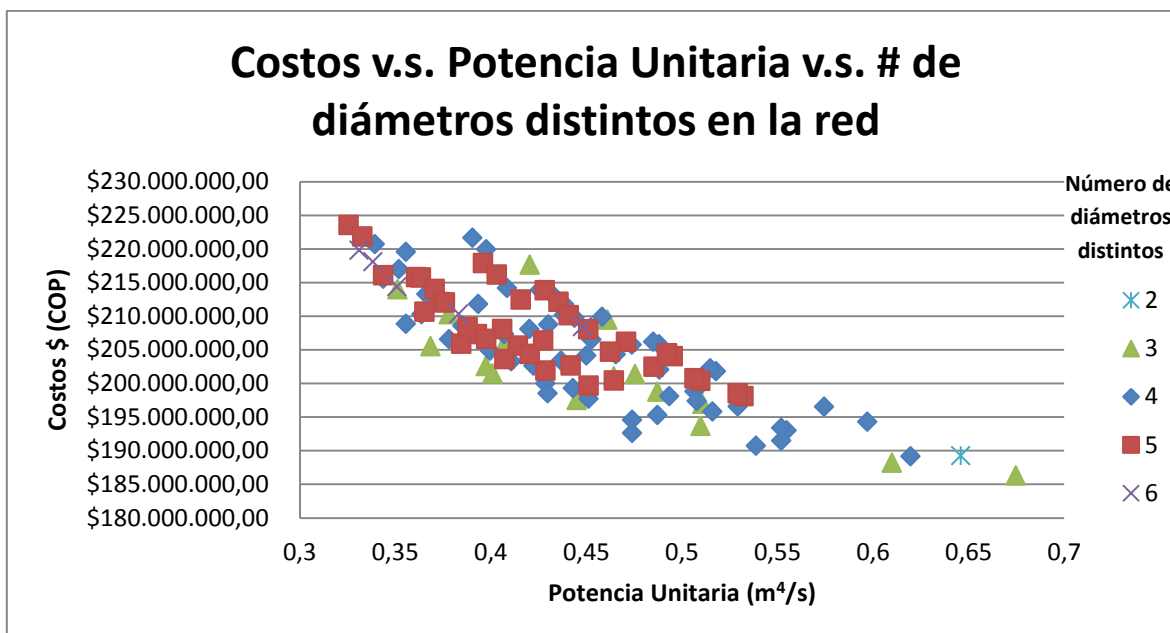


Figura 4.90. Relación de los costos constructivos, la potencia unitaria y la cantidad de diámetros distintos que hay a lo largo de la red para la Ciudad # 23.

4.25. Tendencias regulares e irregulares

Para realizar un análisis a las gráficas que presentan la relación de costos constructivos y potencia unitaria, se las dividirá en 2 grupos. Un grupo de tendencias regulares que tendrá R^2 's mayores o iguales a 0.7, los cuales se caracterizan por tener tendencias robustas y homogéneas. Por otra lado, el grupo de tendencias irregulares tendrá R^2 's menores a 0.7, y se caracterizan por tener tendencias débiles y heterogéneas, observándose una dispersión irregular de los datos

Esta división se debe a que las gráficas que pertenecen al grupo regular presentan una mayor cantidad de posibilidades, provocando una imagen mucho más homogénea que las gráficas irregulares; además estas posibilidades se encuentran mucho más cercanas entre si, induciendo que se junten más los datos y por ende exista una tendencia más suave visualmente. Como se demuestra en las Figuras 7.1 en los Anexos, con la Ciudad # 1 que es regular, en contraste con las Ciudades # 2, # 6, #13, Figuras 7.4, 7.6 y 7.8 respectivamente. Entre otras que siguen el mismo patrón.

También, existen unas agrupaciones de datos que se observan de manera notoria, como en las Figuras 4.73 y 4.24. Las principales razones a este comportamiento se deben a: Primero, por la baja cantidad de alternativas viables que se presentan, evidenciándose agrupaciones de datos; además estos mismos tipos de agrupaciones se presentan en todas las gráficas, pero unas se evidencias más que otras. Y segundo, se debe a que existen posibilidades que tienen exactamente la misma profundidad de diseño pero que pueden contener diferencias en cuanto a pendientes y diámetros, como también pueden presentar tanto altas como bajas variaciones en éstas dos últimas variables, lo que provoca por ende, su agrupación o su separación.

4.26. Calculo de flechas

Para las alternativas óptimas de cada ciudad, se realizó el cálculo respectivo de flecha hidráulica de la misma forma en que Wu la aplicó en 1975, como se explicó detalladamente en el Apartado 3.3.2.

Lo anterior dio como resultado las Figuras 7.9 al 7.30, que se encuentran en los Anexos, donde la línea verde titulada como “Real”, es el perfil hidráulico de la alternativa óptima, la línea azul titulada “Ajuste”, es la regresión cuadrática sobre el perfil hidráulico y por último, la línea roja titula “Línea”, es la unión del primer y último dato de la línea azul, para formar una línea recta que permitirá hallar la altura máxima que existe (en metros) entre la línea azul y roja, dicha altura se dividirá sobre la altura total vertical que se forma desde el primer punto hasta el último de la línea azul, para así obtener el porcentaje de flecha ajustada. Y el porcentaje de flecha real, se obtiene de la misma manera pero remplazando la línea azul por la línea verde.

Finalmente, se resumen los resultados en la Tabla 4.47 y se representan de manera gráfica en la Figura 4.91 para la Flecha Real y en la Figura 4.92 para la Flecha Ajustada.

Como resultado de todas las ciudades, se presentan dos tipos de flechas hidráulicas, unas positivas donde la curva es cóncava hacia abajo y unas negativas, donde la curva es cóncava hacia arriba. Esto es un comportamiento distinto al esperado, pues se esperaba obtener resultados similares a los encontrados por I-pai Wu.

Los resultados muestran que la flecha óptima real positiva varía entre un 5% y un 15% y la flecha óptima real negativa varía entre un -3% y un -10%. De manera similar, varía la flecha ajustada, pero los rangos aumentados desde 0% hasta 15%, para las flechas positivas y desde 0% hasta -10%, para las flechas negativas. Este comportamiento negativo, posiblemente tiene sus orígenes en cómo se distribuyen las demandas a lo largo de la red, y para demostrar lo dicho anteriormente, se desarrollará un método que permita observar la distribución o variabilidad de las demandas. Primero se dividirán en tres secciones iguales, sumando las tres primeras demandas para la primera sección, las tres siguientes demandas para la segunda sección y las últimas tres para la última sección, en el caso de ciudades con 9 tramos. Para ciudades de 10, 11 y 12 tramos, su cuarta sección tiene 1, 2 y 3 demandas respectivamente.

Entonces el porcentaje de variación será igual a la sección máxima menos la sección mínima, dividido la sección máxima, $\% var = (SecMax - SecMin)/SecMax$. Esto da como resultado, las Figuras 4.93, 4.94 y 4.95. En las etiquetas se encuentra el número de cada ciudad. Estas gráficas muestran la distribución de las flechas a medida que cambia el porcentaje de variación. Así, se observa que las flechas negativas presentan los porcentajes de variación más altos, mayores al 75%. Esto quiere decir que entre una sección y otra, hubo un cambio importante en la demanda.

Tabla 4.47. Resumen del cálculo de flechas hidráulicas.

Ciudad #	Flecha Real		Flecha Ajustada	
1	0.212	6.222%	0.116	3.385%
2	0.235	6.523%	0.164	4.388%
3	0.446	12.646%	0.309	9.145%
4	0.188	5.306%	0.135	3.730%
5	-0.129	-3.547%	-0.016	-0.450%
6	0.322	9.112%	0.261	7.476%
7	0.388	10.909%	0.150	4.570%
8	-0.204	-5.756%	-0.196	-5.504%
9	0.332	9.290%	0.274	7.585%
10	0.335	9.654%	0.271	7.614%
11	0.291	8.256%	0.256	7.209%
12	-0.331	-9.466%	-0.217	-5.980%
13	0.481	13.172%	0.490	12.984%
14	-0.232	-6.306%	-0.067	-1.947%
15	0.515	14.595%	0.468	13.482%
16	0.250	6.856%	0.118	3.069%
17	-0.202	-5.530%	-0.067	-1.723%
18	0.333	9.112%	0.323	8.976%
19	-0.350	-9.733%	-0.245	-6.843%
20	0.253	7.313%	0.103	2.856%
21	-0.194	-5.790%	-0.144	-4.310%
22	-0.237	-7.150%	-0.121	-3.810%
	Promedio +	9.212%	Promedio +	6.891%
	Promedio -	-6.660%	Promedio -	-3.821%

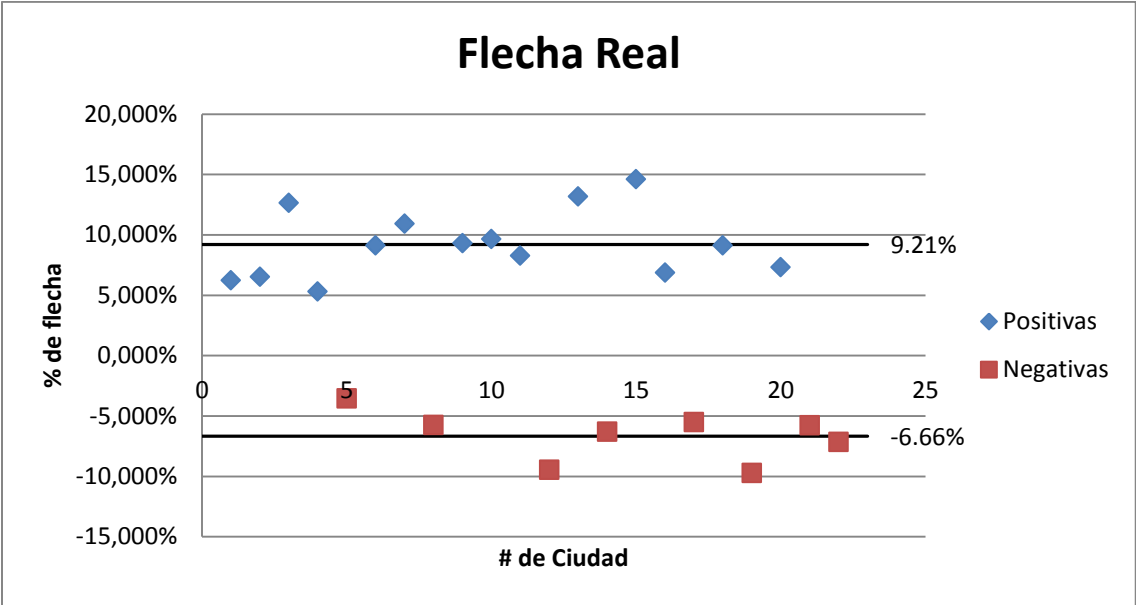


Figura 4.91. Porcentajes de flechas reales de todas las ciudades.

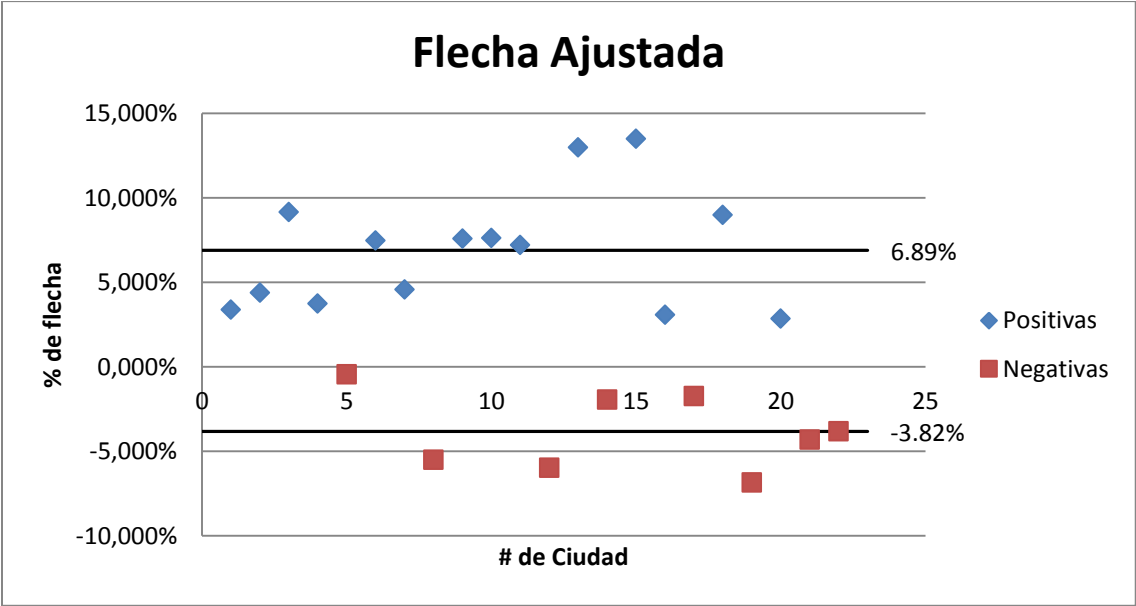


Figura 4.92. Porcentajes de flechas ajustadas para todas las ciudades.

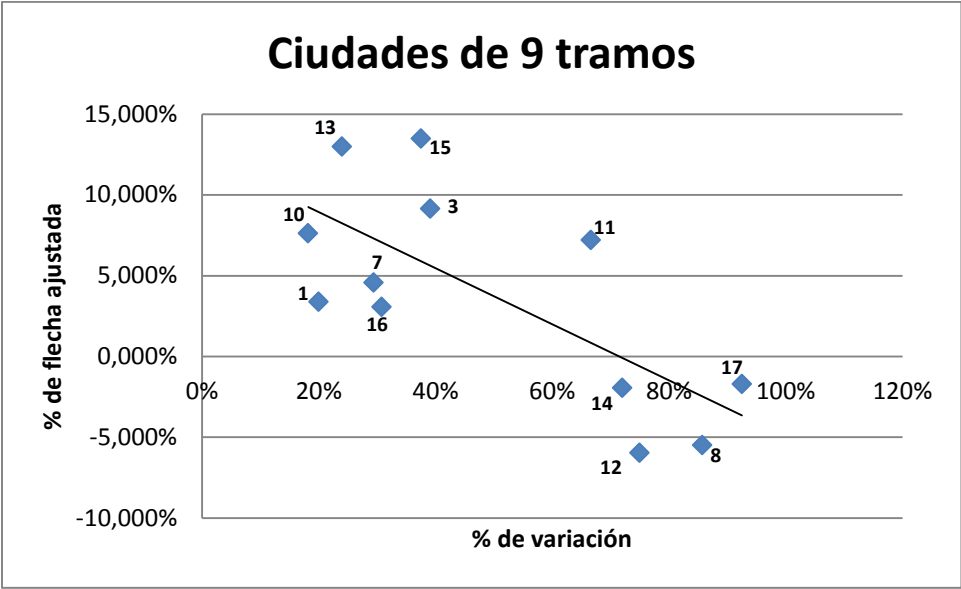


Figura 4.93. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 9 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).

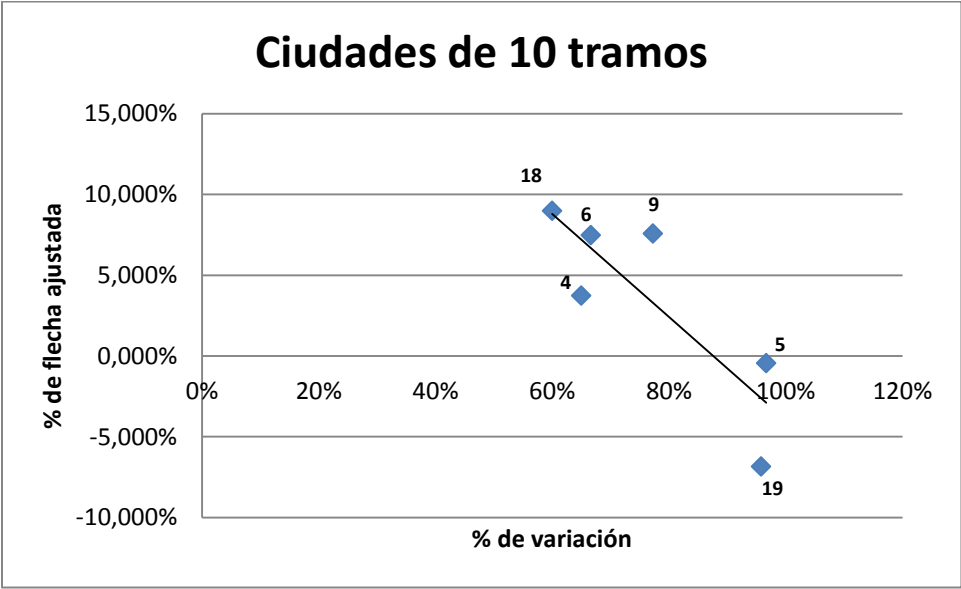


Figura 4.94. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 10 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).

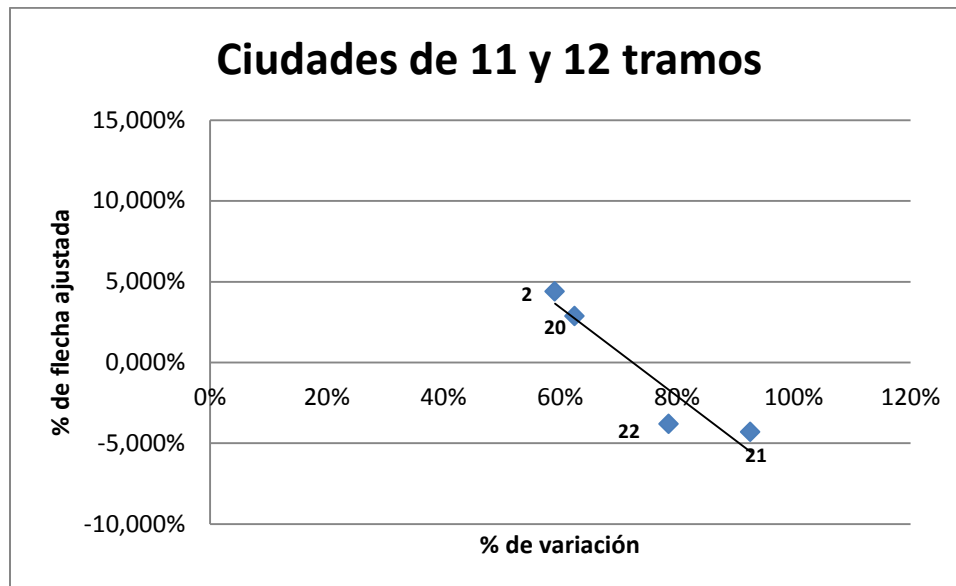


Figura 4.95. Porcentaje de variación de las demandas versus el porcentaje de flecha ajustada, para las ciudades de 9 tramos (las etiquetas son el número de la ciudad).

4.27. Costos Computacionales

El desarrollo de cada uno de los algoritmos tomó distintos tiempos de cómputo (estos tiempos se muestran en cada una de las ciudades) que dependían en gran parte del procesador del computador y de la complejidad del algoritmo. Para el desarrollo del proyecto se usaron un total de 5 computadores, 2 proporcionados por el CIACUA (ambos con un procesador IntelCore i5 1Generacion y 4 GB de RAM) y 3 de uso personal (uno con IntelCore i3 2Generacion y 4 GB de RAM, el otro con IntelCore Duo y 2 GB de RAM y el ultimo con Intel Pentium 4 y 1GB RAM).

Debido al número de equipos disponibles para hacer las verificaciones, se repartieron las alternativas de tal manera que cada computador estuviera encargado de verificar las máximas posibles, teniendo un limite de 1,048,576 alternativas a evaluar por computador, a razón de que una hoja de EXCEL® solo posee ésta cantidad de filas. Es importante mencionar que el rendimiento de los computadores no es lineal, la razón de esto es que a medida que transcurre el tiempo, el computador empieza a perder eficiencia debido al calentamiento del equipo, entre otros factores, como el año del equipo, el uso cotidiano que se le dé, la marca del equipo, el tipo de procesador y memoria RAM que tengan, etc. El uso de uno o varios computadores difirió debido a la disponibilidad, rendimiento y capacidad de los mismos.

Según lo anterior y los resultados obtenidos en el trabajo, los algoritmos de poda fueron los de mayor costo computacional, pues evalúan cada una de las alternativas posibles. Adicionalmente, a medida que las posibilidades aumentaban por la cantidad de tramos a usar, también lo hacían los costos computacionales (tanto temporales como de cálculo). Esto quiere decir, que si se supone que todos los tramos que se van a usar, poseen la misma cantidad de pendientes lógicas, en este caso 4, se tendrá como resultado la Tabla 4.48. Por lo tanto, el tiempo necesario para evaluar todas las alternativas posibles aumenta exponencialmente por cada tramo que se le agregue a la ciudad.


Tabla 4.48. Costo Computacional Aproximado³ (Datos reales en negrilla).

# de tramos	Alternativas posibles	Tiempo necesario aproximado
1	4	0.1 segundos
2	16	0.2 segundos
3	64	0.6 segundos
4	256	2.2 segundos
5	1,024	7.5 segundos
6	4,096	25.9 segundos
7	16,384	1.5 minutos
8	65,536	5.2 minutos
9	262,144	22.5 minutos
10	1,048,576	1.5 días
11	4,194,304	4.5 días
12	16,777,216	12.4 días
13	67,108,864	1.4 meses
14	268,435,456	4.8 meses
15	1,073,741,824	16.7 meses

4.28. Cálculo de regresiones multivariadas

Este procedimiento se realizó con el software MATLAB®, mediante la herramienta “*cftool*” (*Curve Fitting Tool*) por sus siglas en inglés. Esta herramienta se usó para realizar regresiones lineales y potenciales multivariadas permitiendo obtener las Figuras 7.23 a la 7.43 que se encuentran en los Anexos. La variable dependiente fue el costo en \$COP, designada como Z , y las variables independientes serán X , como la potencia unitaria en m^4/s y Y , como la profundidad total de la red en metros.

Como se analizó anteriormente, las variables potencia unitaria y profundidad de la red afectan los precios considerablemente, debido a esto se plantearon dos tipos distintos de regresiones; la primera se aproximó a una regresión lineal y la segunda, a una regresión potencial como se muestra en la Tabla 4.49.

Los costos se normalizaron para evitar errores de redondeo y de truncamiento al momento de realizar las regresiones, además de esto, se obtuvieron los R^2 (coeficientes de determinación) para observar la calidad de ambos ajustes. Finalmente, la ciudad número 5 no aparece en la tabla puesto que solo tenía 2 datos.

³ Los días son de 24 horas y los meses de 31 días, y para realizar el cálculo del tiempo necesario, se utilizaron los datos reales de las ciudades que contenían la misma cantidad de alternativas posibles, exactamente para los casos de 9, 10 y 11 tramos. Y a partir de estos tres datos se realizó una regresión exponencial (tiempo en horas = $0.0001 * \exp(1.2425 * \text{alternativas posibles})$) para extrapolar los demás datos.

Tabla 4.49. Constantes de las regresiones lineales y potenciales de todas las ciudades.

Ciudad #	$\frac{Z}{1x10^8} = A + B * x + C * y$				$\frac{Z}{1x10^8} = A * x^B * y^C$			
	A	B	C	r ²	A	B	C	r ²
1	2.6410	-2.1520	-0.0003	0.8618	1.7060	-0.1534	0.0088	0.8659
2	4.7810	-0.1318	-0.1734	0.6977	6.4300	0.0443	-0.2805	0.7538
3	3.8510	-4.3070	0.0477	0.8307	1.9060	-0.2502	0.0773	0.8138
4	3.6230	-4.0350	0.0773	0.8291	1.7230	-0.2676	0.1170	0.8049
5								
6	4.6160	0.0968	-0.2056	0.6090	5.2510	-0.0009	-0.2322	0.5707
7	3.8840	-3.8910	0.0335	0.9125	2.2360	-0.1916	0.0467	0.8901
8	3.8190	-7.1070	0.1335	0.6863	1.5830	-0.3039	0.1120	0.7277
9	4.3060	-2.6470	-0.0572	0.8386	2.9520	-0.1623	-0.0571	0.8269
10	3.0870	-2.5160	-0.0018	0.8923	1.8490	-0.1876	0.0193	0.8956
11	3.1700	-2.7400	0.0182	0.8588	1.8450	-0.1972	0.0421	0.8694
12	2.9070	-15.0000	0.2689	0.9528	0.4023	-0.5053	0.4726	0.9672
13	4.2710	-1.3120	-0.0658	0.7063	3.6440	-0.0855	-0.0787	0.6526
14	4.1420	-3.8290	0.0330	0.7178	2.2590	-0.2233	0.0564	0.6923
15	3.2970	-2.6300	-0.0055	0.7489	2.1680	-0.1466	0.0032	0.7506
16	4.1490	-1.2590	-0.0774	0.4904	3.5310	-0.0828	-0.0852	0.4236
17	4.4630	-2.0540	-0.0310	0.7597	2.7780	-0.1969	0.0261	0.8887
18	4.8420	-1.1660	-0.1264	0.6174	3.9870	-0.1046	-0.0992	0.5634
19	4.8400	-2.3850	-0.0774	0.7843	5.8820	-0.0051	-0.2664	0.9195
20	4.8270	-5.1260	0.0100	0.8826	2.6060	-0.2176	0.0279	0.8794
21	3.0180	-6.5190	0.2138	0.8987	0.7831	-0.4379	0.3484	0.9029
22	2.6290	-11.8300	0.2365	0.9310	0.4361	-0.4920	0.4093	0.9183

Analizando la Tabla 4.49, se evidencia que ambas variables afectan los costos, pero la potencia unitaria disminuye los costos con mayor fuerza que la profundidad de la red para ambas regresiones, causando que la potencia unitaria sea más significativa que la profundidad de la red, opacando el efecto de ésta última. Esto es consecuencia de la relación de costos que se manejó y explicó en apartados anteriores, pero no quiere decir que los costos no sean afectados por la profundidad. Además, la potencia unitaria y la profundidad de la red son funciones directas de una misma variable (la pendiente de los tramos que la conforman) provocando que ambas variables se comporten de manera similar, es decir, que al aumentar la potencia unitaria o la profundidad disminuirá los costos.

Por último, la Figura 4.96 demuestra que no existe una diferencia significativa entre ambas regresiones, pero se propone utilizar la regresión potencial porque de una manera u otra, permite una estandarización de las constantes de regresión de interés (B,C), lo que permite evidenciar la influencia individual de la potencia unitaria y profundidad de la red, como en la Ciudad 17 y 19, donde la profundidad es una variable más importante que la potencia unitaria, lo que no se hubiera observado en una regresión lineal, en consecuencia mejora el coeficiente de determinación; esto sucede de manera similar a las tendencias regulares, y de manera opuesta con las tendencias irregulares.

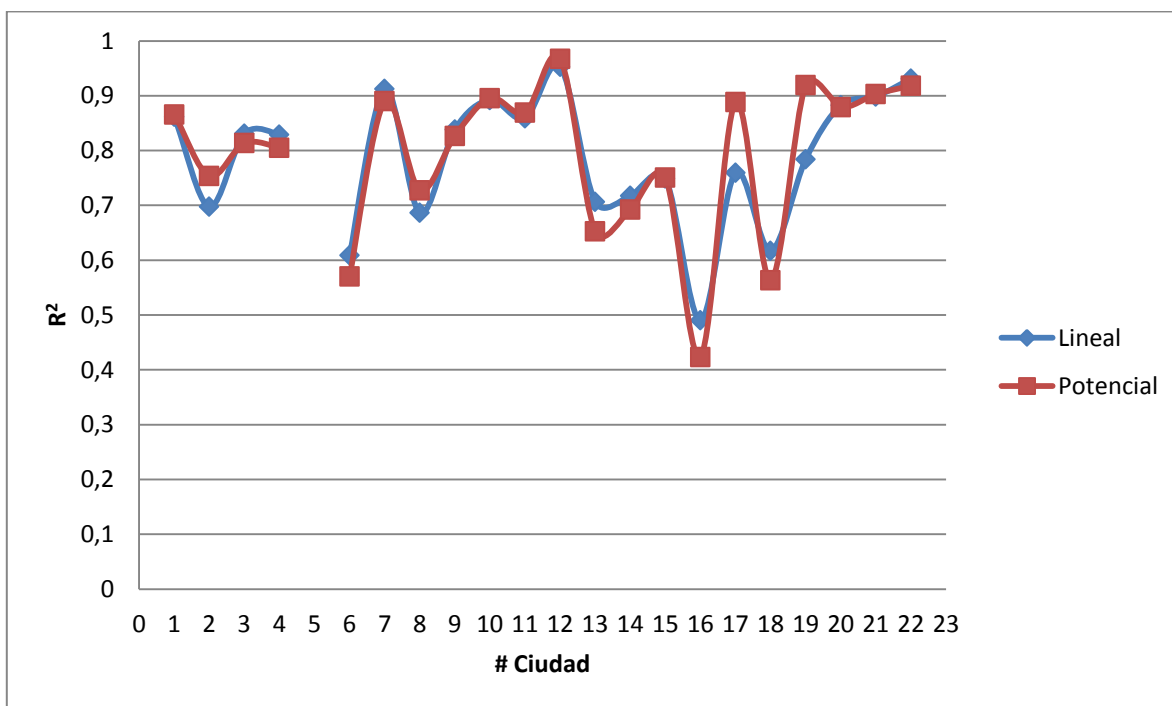


Figura 4.96. Variación de los coeficientes de determinación (R^2) para la regresión lineal y potencial en todas las ciudades.

5. Conclusiones y recomendaciones

- Todas las ciudades muestran la misma tendencia en la relación costo constructivo versus potencia unitaria, confirmando las afirmaciones que realizaron López Sabogal e Ivonne Navarro en sus trabajos en el 2011 y 2009, respectivamente. Esta afirmación es: “ Los costos constructivos más bajos se presentan cuando la potencia unitaria es elevada en la red de drenaje urbano”
- De manera más detallada y según los resultados obtenidos de este trabajo, se observa que de las alternativas viables, las alternativas óptimas, es decir, las alternativas menos costosas provienen de las alternativas que tienen mayor potencia unitaria, de las que mayor profundidad tienen, y de las que menos cambios de diámetro a lo largo de la red presentan.
- Por lo tanto, el menor costo no siempre se presentará cuando se tiene la máxima potencia unitaria o cuando se tiene el menor cambio de diámetros o cuando se presenta la mayor profundidad posible.
- En contraste con lo que se pensaría, que entre menos profunda este la red de drenaje urbano más barato saldría la construcción, los resultados de este trabajo deducen lo contrario. Esto se debe a la gran importancia que tiene en la fórmula de costos; además por lo que se explicó en el Apartado 3.3.1, la variable “diámetro” tiene mayor peso en la fórmula de costos en comparación con la variable “pendiente”. Este análisis es válido únicamente para terrenos sin pendiente. Como consecuencia se tiene que las pendientes de las tuberías están limitadas a pendientes relativamente bajas, dando relativamente poca variabilidad de costos entre una pendiente y otra.
- Debido al alto costo computacional que tiene la metodología explícita de optimización, pero que presenta facilidad de implementación y alta efectividad, se recomienda mejorar el algoritmo de poda para hacerlo más eficiente, evitando que se evalúen alternativas que no son viables desde un principio. Por ejemplo, la restricción de diámetros se incumple en los dos primeros tramos de una ciudad, y si se tienen 2 pendientes lógicas, la mitad incumplirían, haciendo que las posibilidades a evaluar disminuyan a la mitad.
- Se recomienda seguir observando la aplicación del criterio de Wu en redes de drenaje urbano, para encontrar una o varias características en común sobre las redes óptimas, ahorrando costos computacionales y temporales para hallar la solución menos costosa.
- De igual manera, se recomienda seguir observando los comportamientos de optimización en redes que presenten diferentes pendientes en el terreno, puesto que el alcance de este proyecto desarrolló una sola ciudad con pendiente en el terreno, limitando el análisis que se pueda realizar a este parámetro (pendiente del terreno).
- Se recomienda considerar más variables a la hora de calcular los costos a fin de verificar si la conclusión de que al maximizar la potencia unitaria, maximizar la profundidad y tener los menores diámetros posibles, se obtendrían menores costos totales. Lo anterior, debido a que para los fines de este proyecto dentro de los costos totales únicamente se consideraron el costo de la tubería y los costos de excavación.

6. Referencias

- Altarejos García, L. (2009). *APLICACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL DESARROLLO URBANÍSTICO DE PATERNA (VALENCIA)*. Recuperado el 25 de Mayo de 2012, de http://www.ciccp.es/biblio_digital/V_Congreso/congreso/pdf/010413.pdf
- Antequera, J. (2005). *El potencial de sostenibilidad de los asentamientos humanos*. Cataluña: Edición electrónica a texto completo en www.eumed.net/libros/2005/ja-sost/.
- ASCE. American Society of Civil Engineers. (2007). *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. Reston, Virginia.: EWRI. Environmental and Water Resources Institute.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Londres: Spon Press.
- De Oro, J. (2008). *Criterios de selección de alternativas de rehabilitación de alcantarillados en Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Gill, E. (2008). Making Space for Water. Urban flood risk & integrated drainage (HA2). *IUD Pilot Summary Report*. Departament for Environmental, Food and Rural Affairs.
- López Herrera, J. G. (2011). *HIDRÁULICA EN ALCANTARILLADOS, Conceptos Básicos*. Pereira: Universidad Libre de Colombia.
- López Sabogal, D. A. (2012). *DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DRENAJE URBANO USANDO EL CONCEPTO DE POTENCIA UNITARIA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Navarro Pérez, I. (2009). *Diseño optimizado de redes de drenaje urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Ovalle Bueno, F. L. (2011). *CRITERIOS DE DISEÑO DE TUBERÍAS FLUYENDO PARCIALMENTE LLENAS: VELOCIDAD MÍNIMA, ESFUERZO CORTANTE MÍNIMO Y NÚMERO DE FROUDE CUASICRÍTICO*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Pavía Santolamazza, D. (2010). *DISEÑO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE REDES DE ALCANTARILLADO UTILIZANDO LOS CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- RAS. (2000). *SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y EVACUACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS Y PLUVIALES*. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá D.C.: Alfaomega.



Saldarriaga, J. (2011). *Clases Sistema Integrado de Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.

World Health Organization & UNICEF. (Agosto de 2010). *A Snapshot of Drinking-water and Sanitation in the MDG region Latin-America & Caribbean*. Recuperado el Mayo de 2012, de http://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/1284626181-LAC_snapshot_2010.pdf



7. Anexos

Table with 9 columns (A-I) and 30 rows of binary data. Rows 6, 7, 101, 106, 107, 126, 131, 132, 136, 137, 138, 1601, 1606, 1607, 1701, 1706, 1707, 1726, 1731, 1732, 1736, 1737, 1738, 2001, 2006, 2007, 2101, 2106 are highlighted with black boxes.

Figura 7.1. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 1 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).

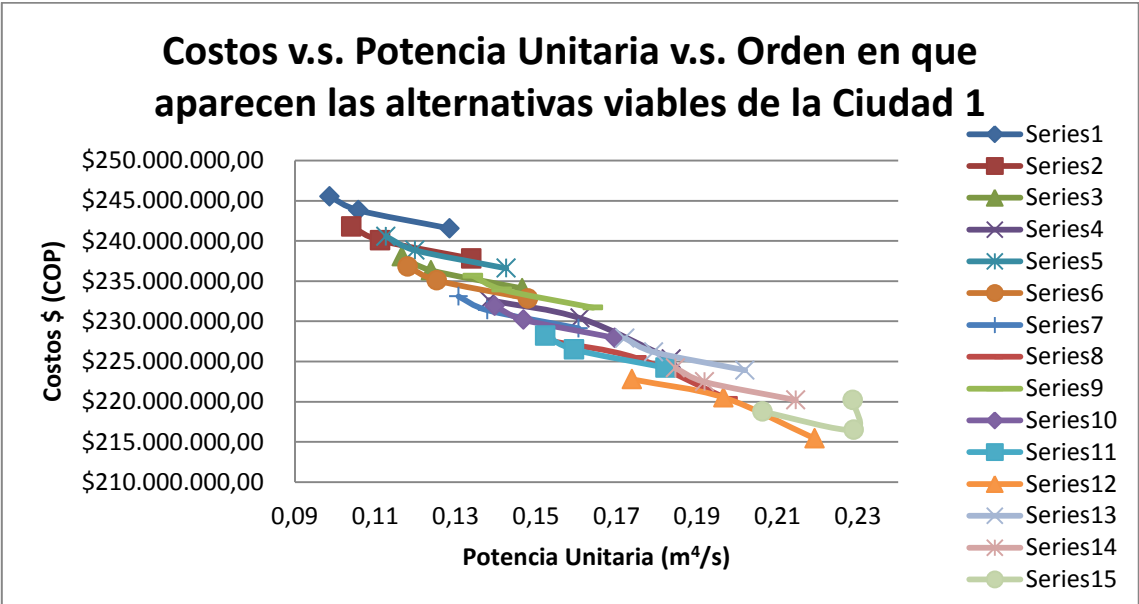


Figura 7.2. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 1.



Table with 11 columns (A-K) and 30 rows of binary data. Rows 156, 157, 2656, and 2657 are highlighted with black boxes.

Figura 7.3. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 2 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).

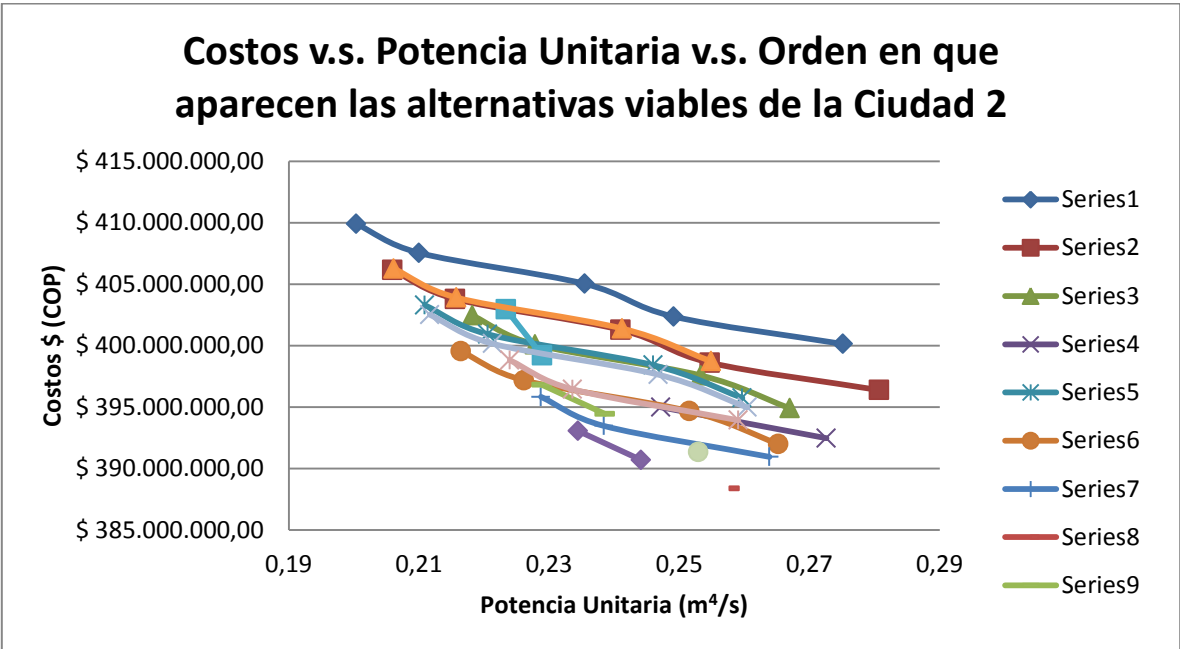


Figura 7.4 Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 2.



Table with 10 columns (A-J) and 30 rows of binary data. Rows 31, 32, 156, and 157 are highlighted with black boxes.

Figura 7.5. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 6 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).

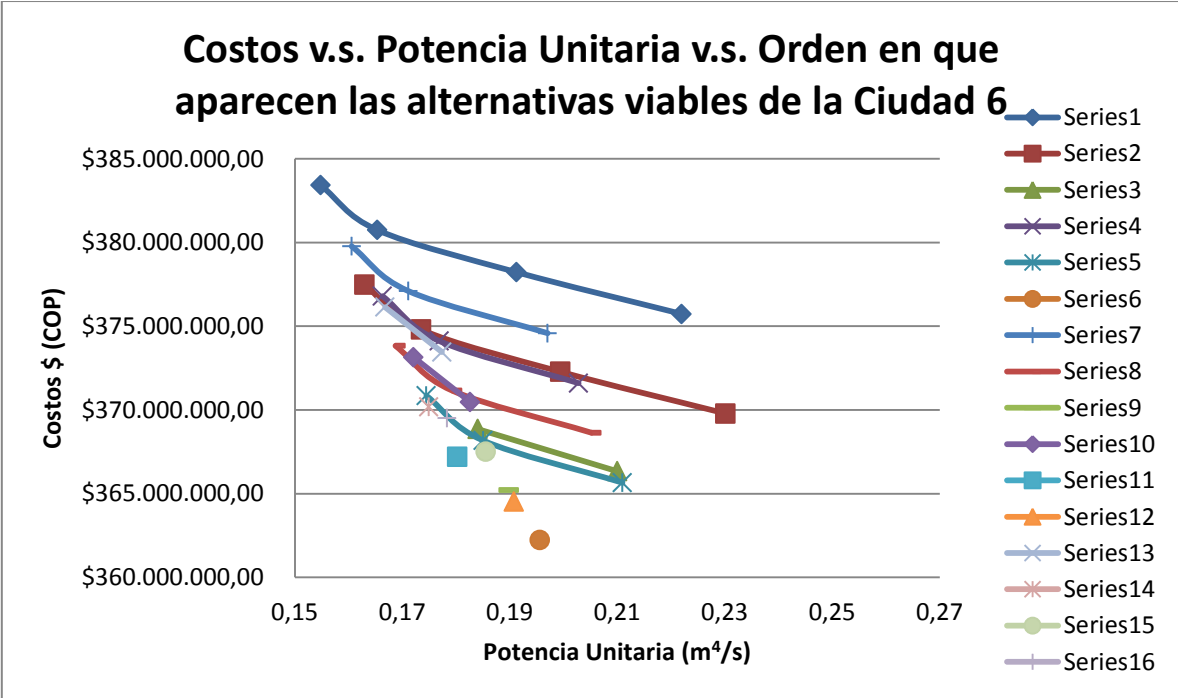


Figura 7.6. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 6.



Table with 10 columns (A-I) and 30 rows of binary data. Rows 156, 157, 781, and 782 are highlighted with black boxes.

Figura 7.7. Orden en que aparecen las primeras alternativas viables de la Ciudad 13 (En los recuadros negros se marcan las alternativas que presentan una solución seguida de la matriz de diseño).

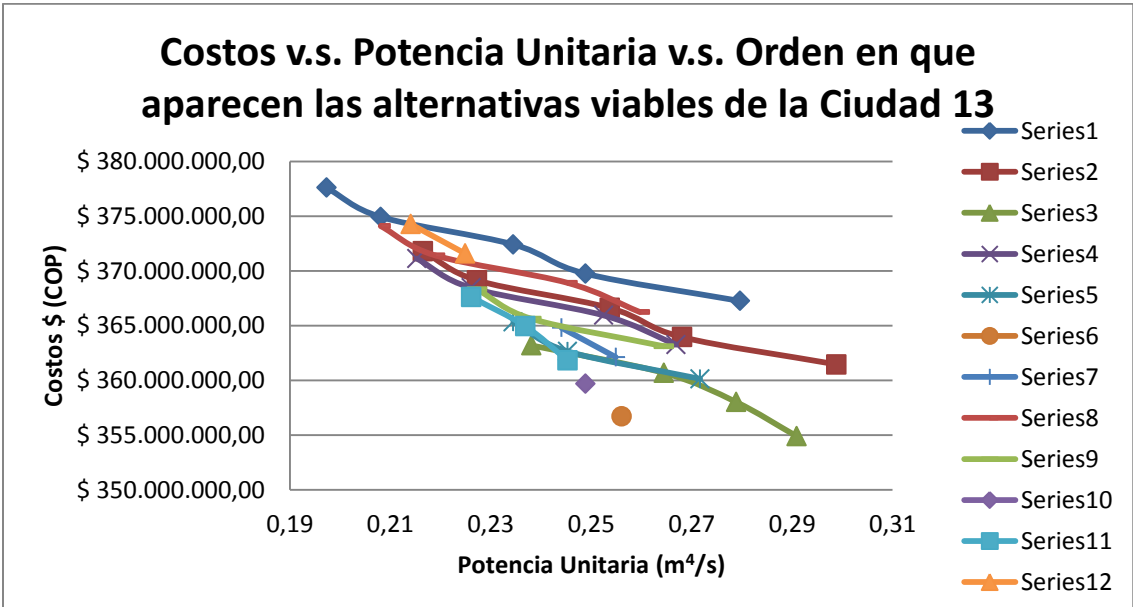


Figura 7.8. Orden en que van apareciendo las alternativas en la gráfica de potencia unitaria versus costos para la Ciudad 13.

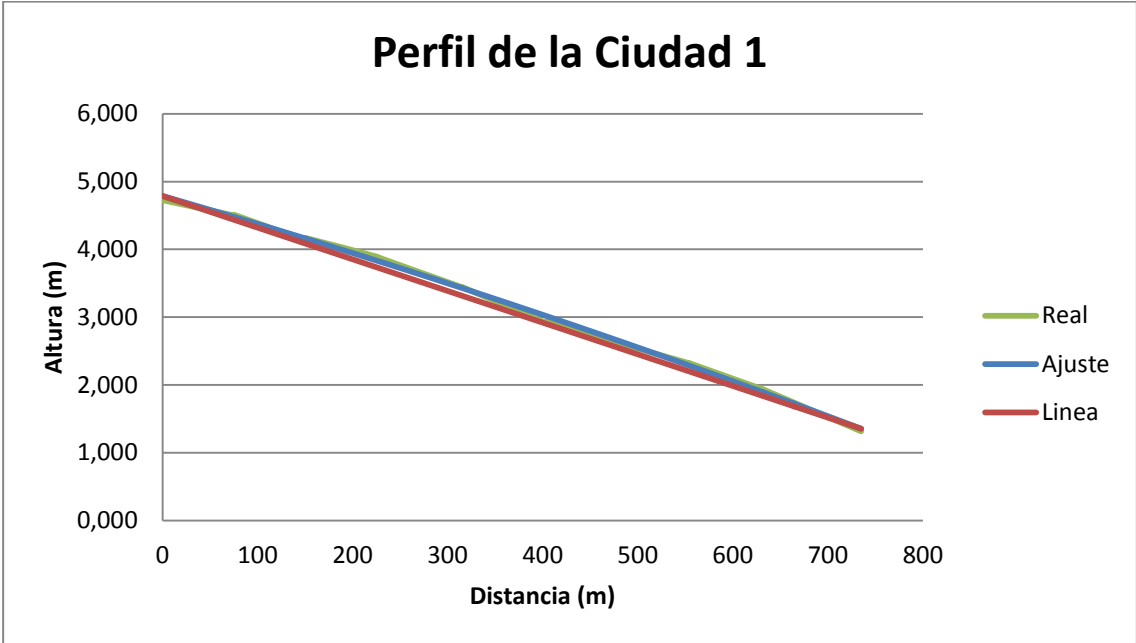


Figura 7.9. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 1.

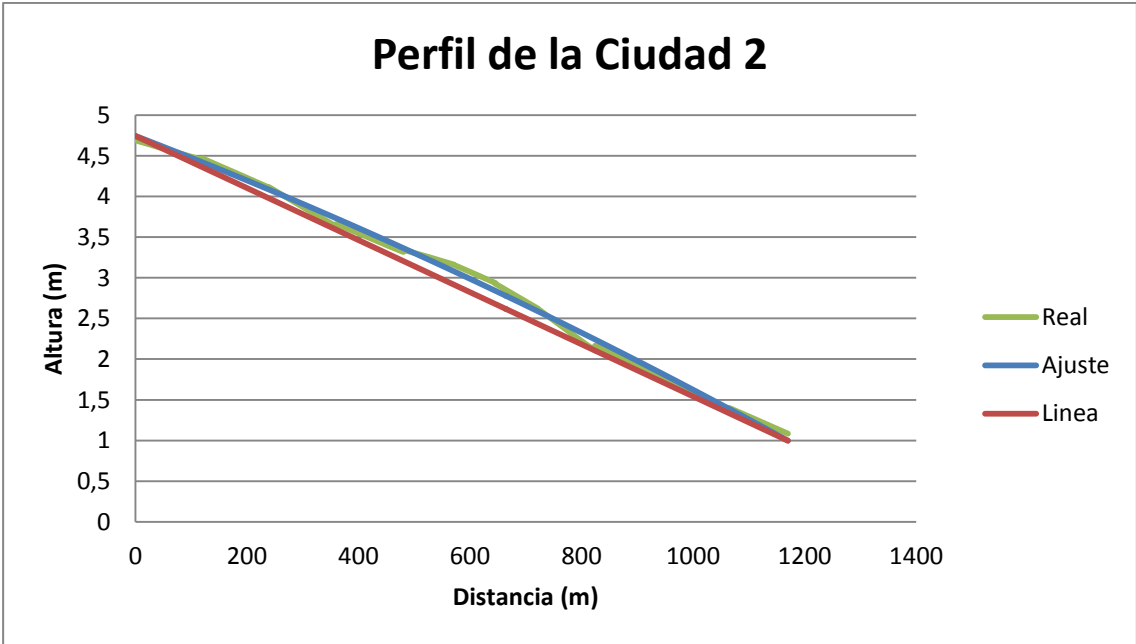


Figura 7.10. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 2.

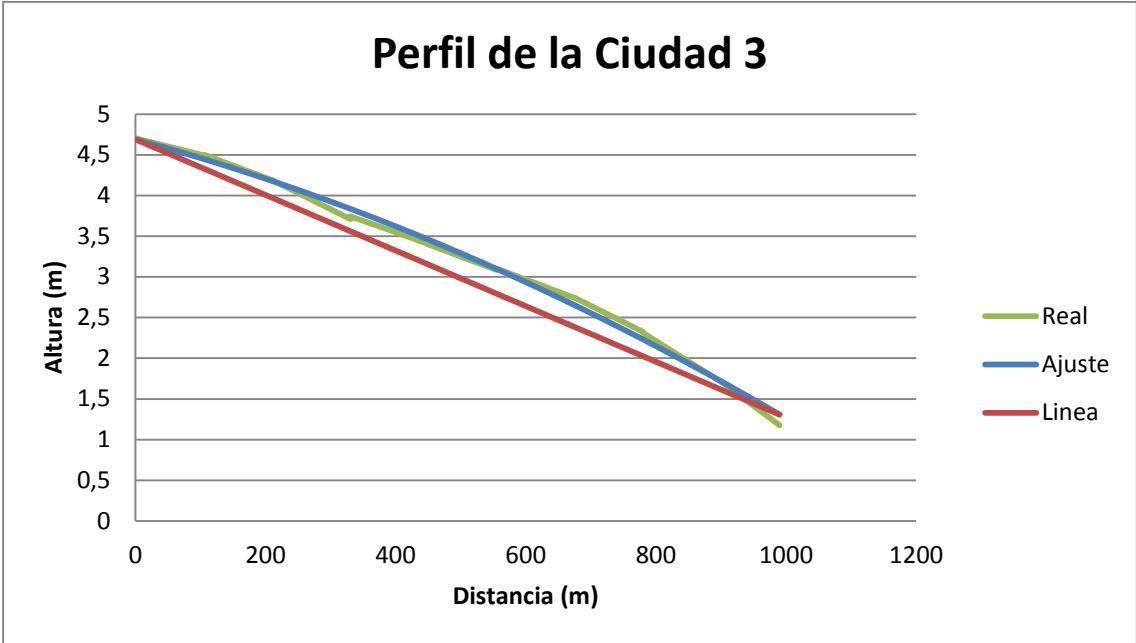


Figura 7.11. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 3.

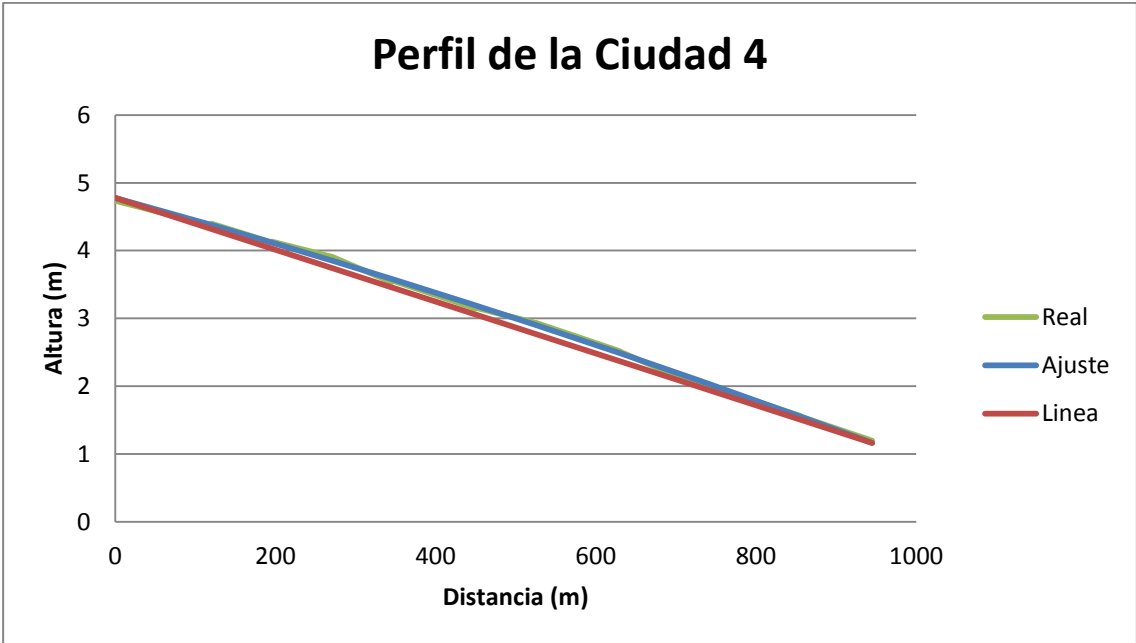


Figura 7.12. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 4.

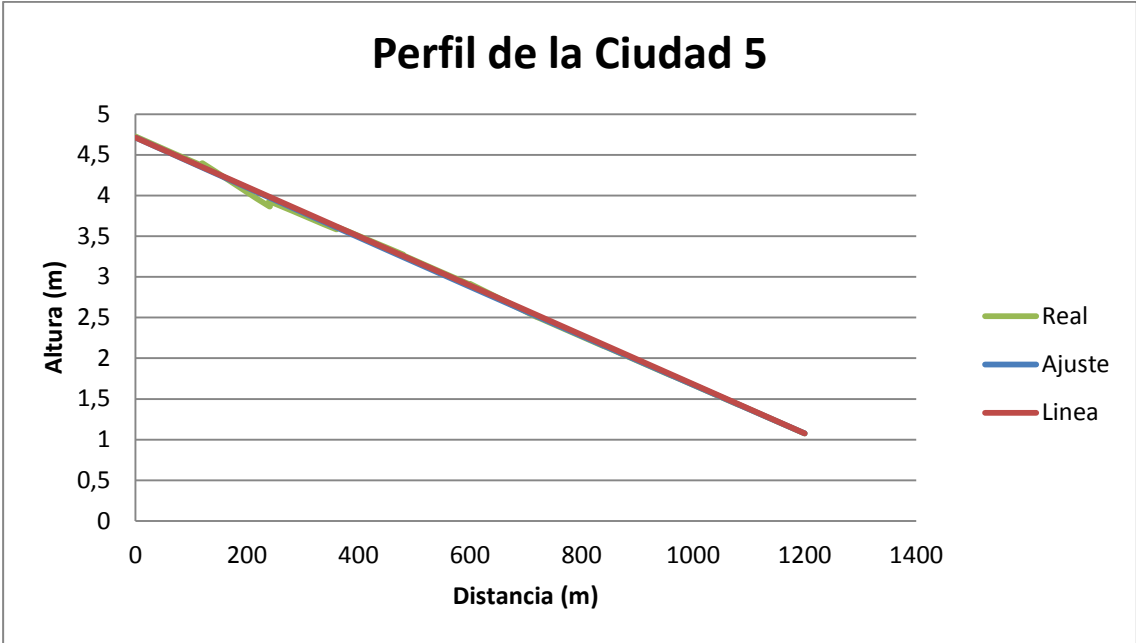


Figura 7.13. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 5.

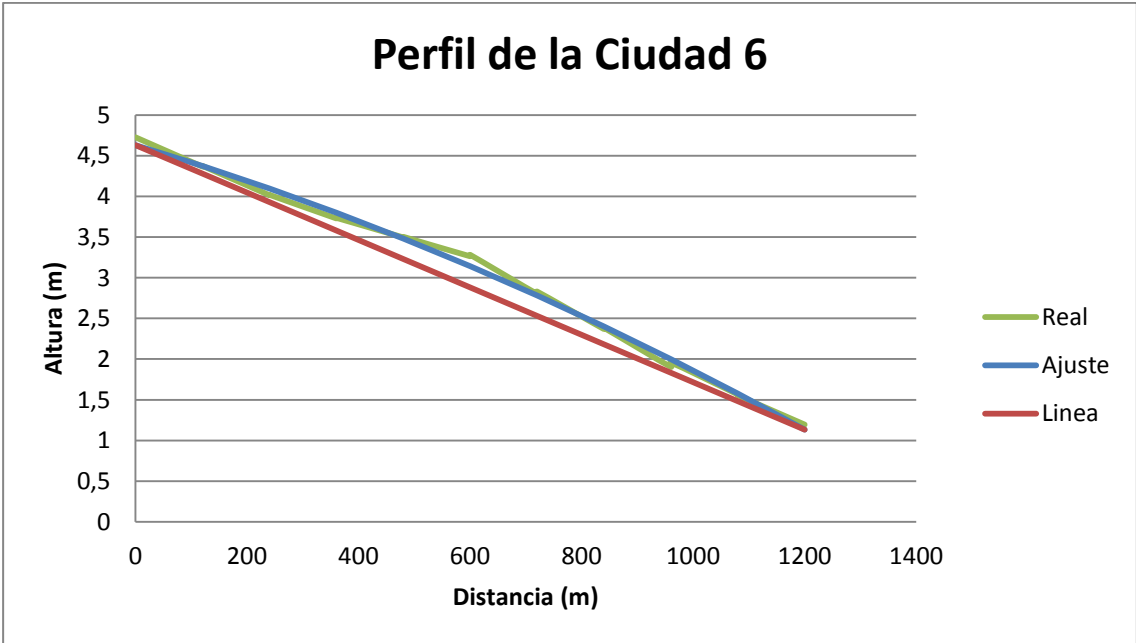


Figura 7.14. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 6.

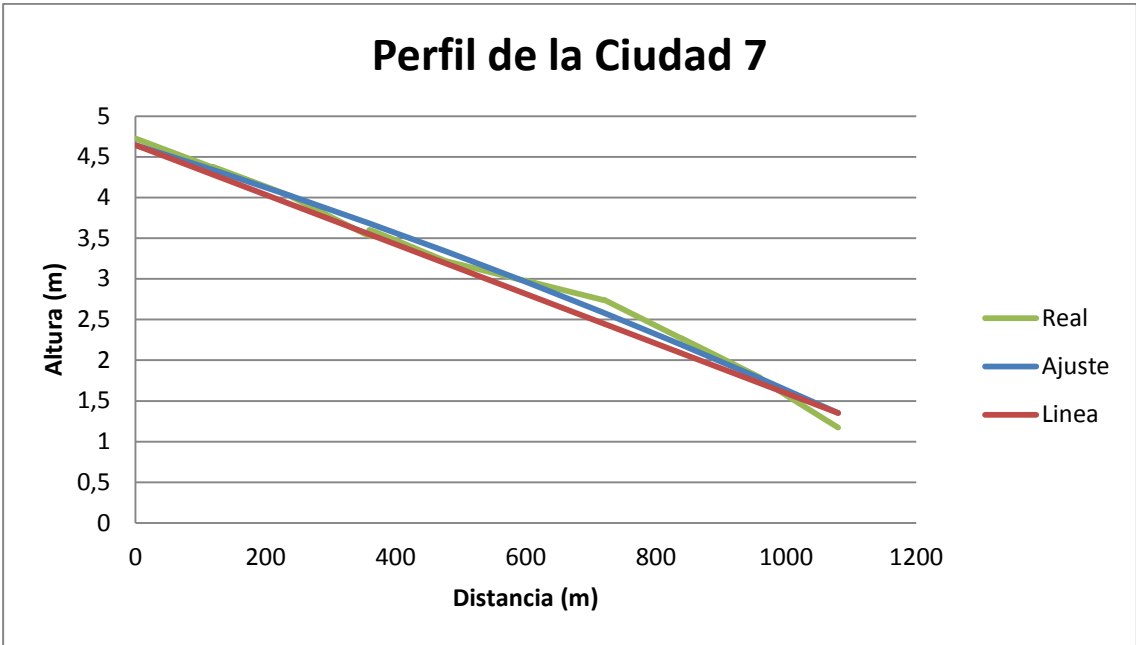


Figura 7.15. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 7.

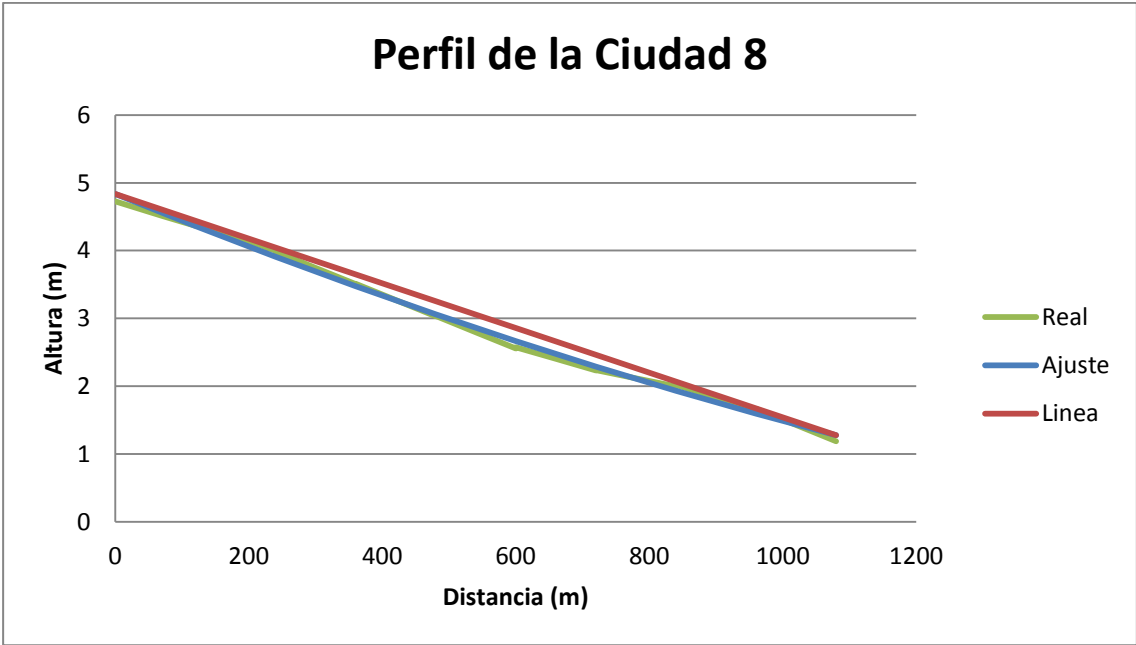


Figura 7.16. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 8.

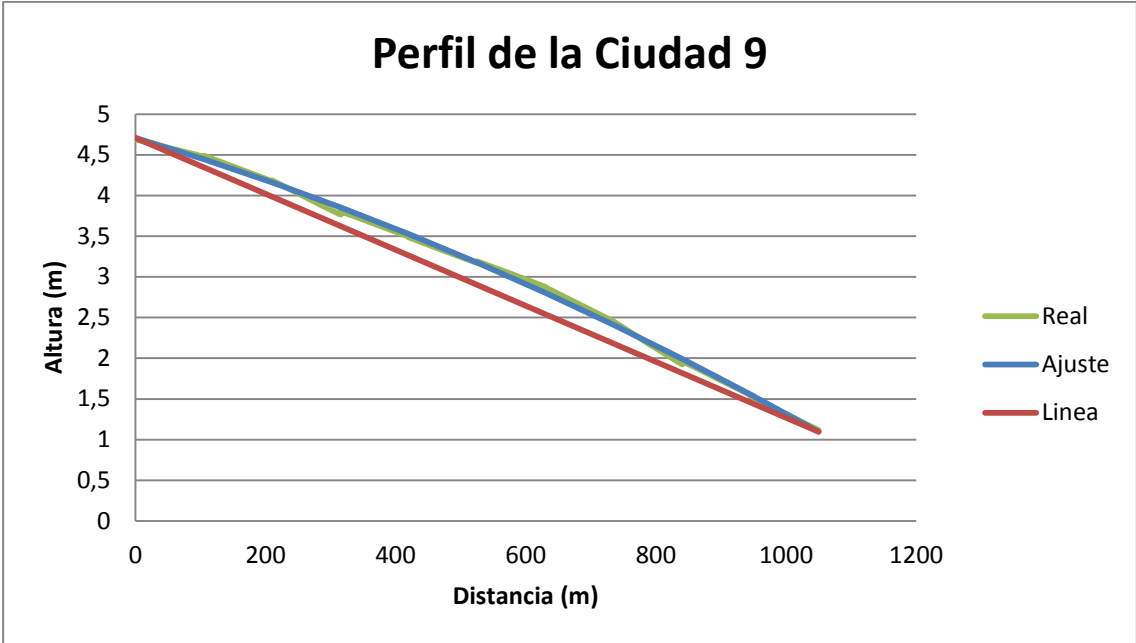


Figura 7.17. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 9.

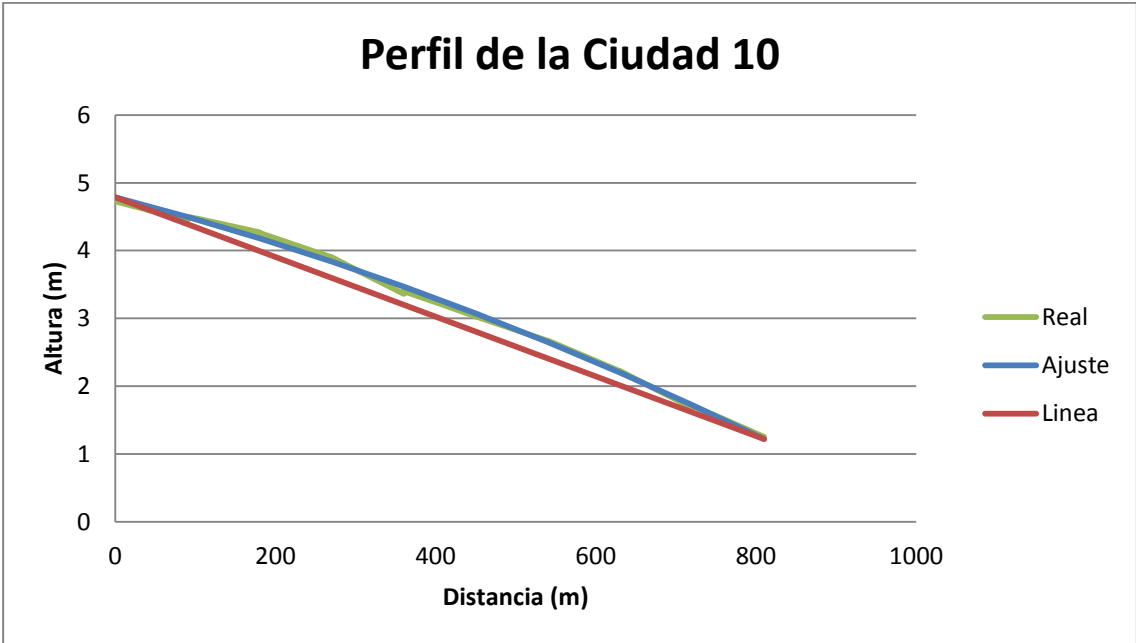


Figura 7.18. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 10.

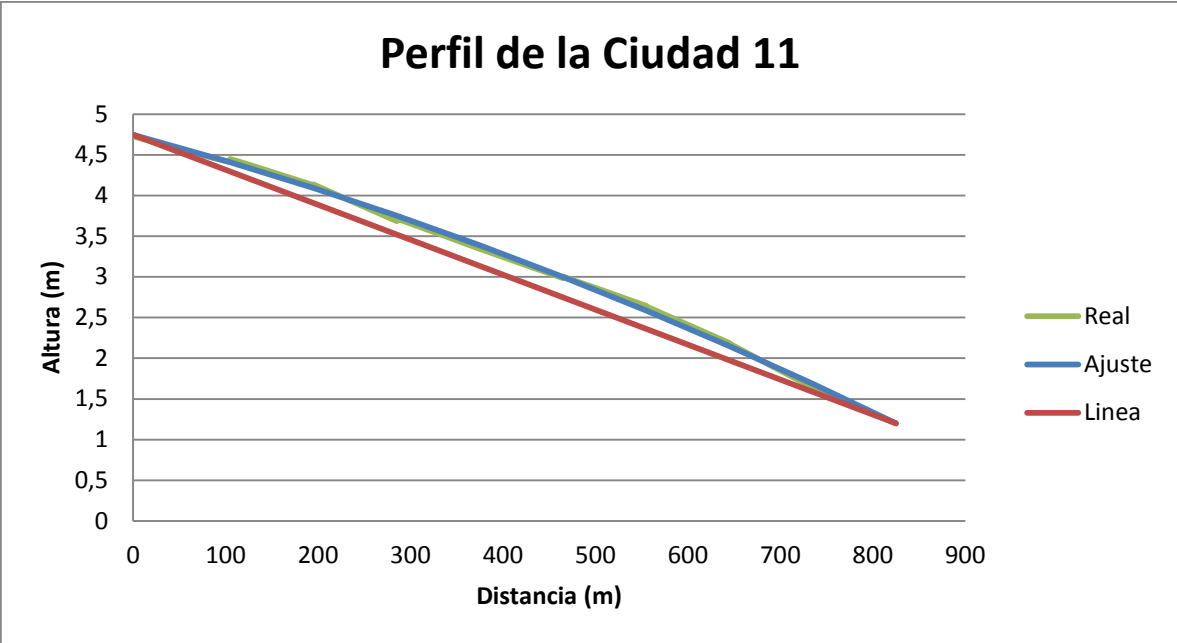


Figura 7.19. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 11.

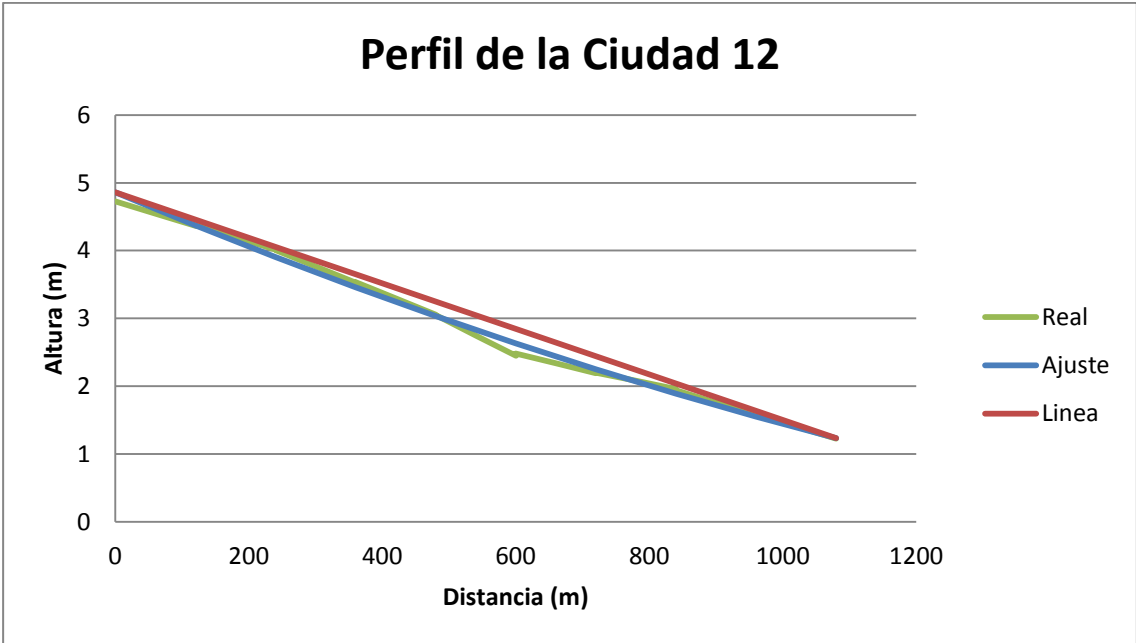


Figura 7.20. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 12.

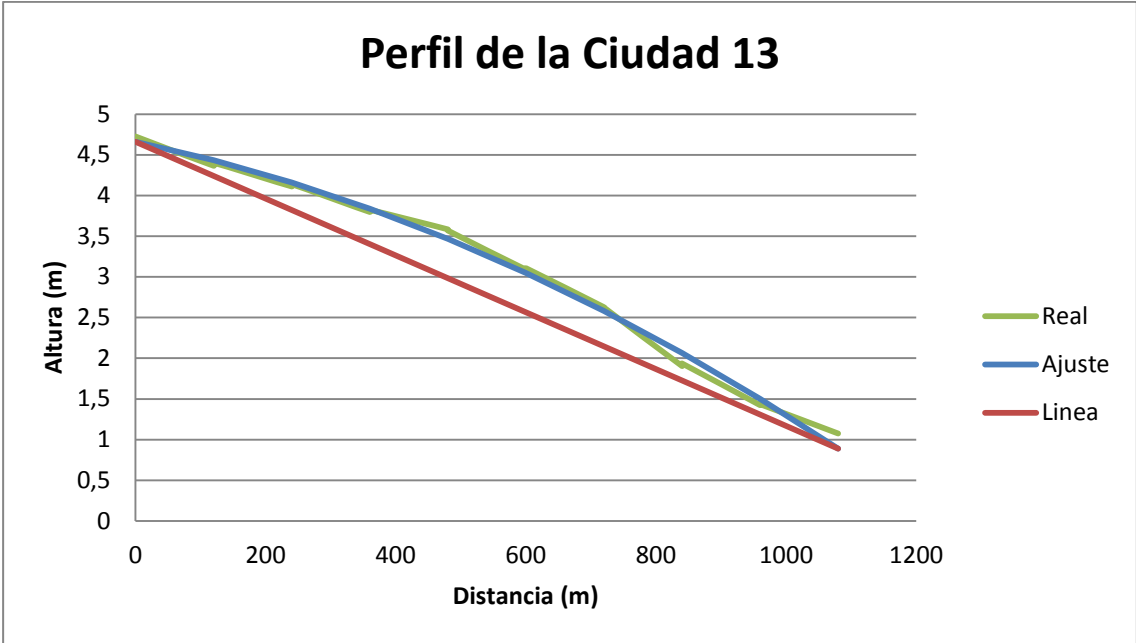


Figura 7.21. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 13.

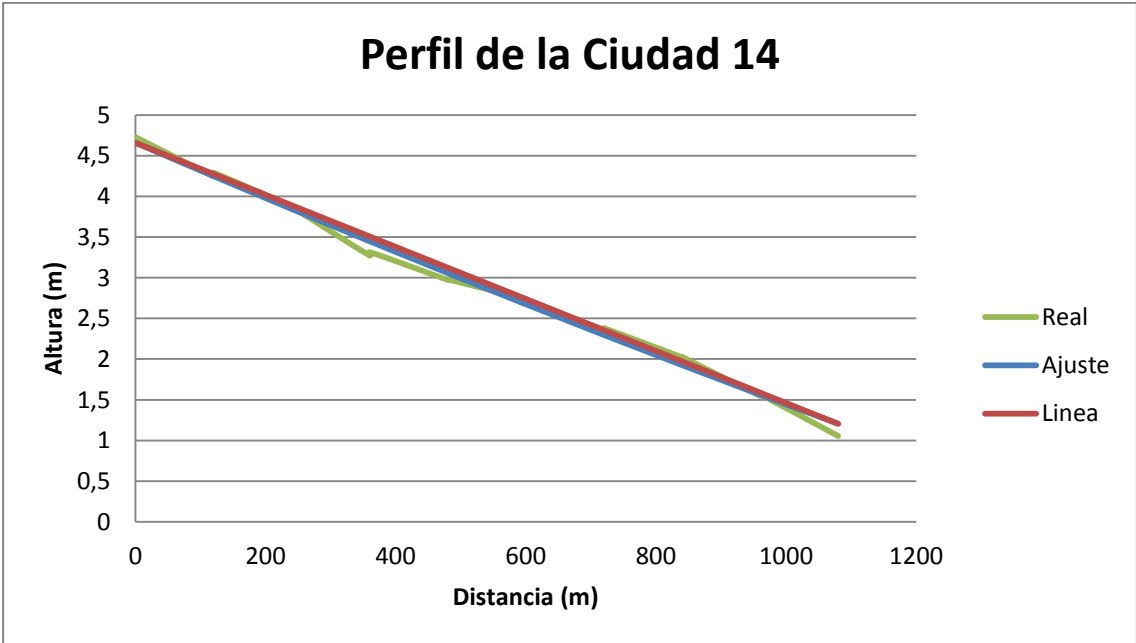


Figura 7.22. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 14.

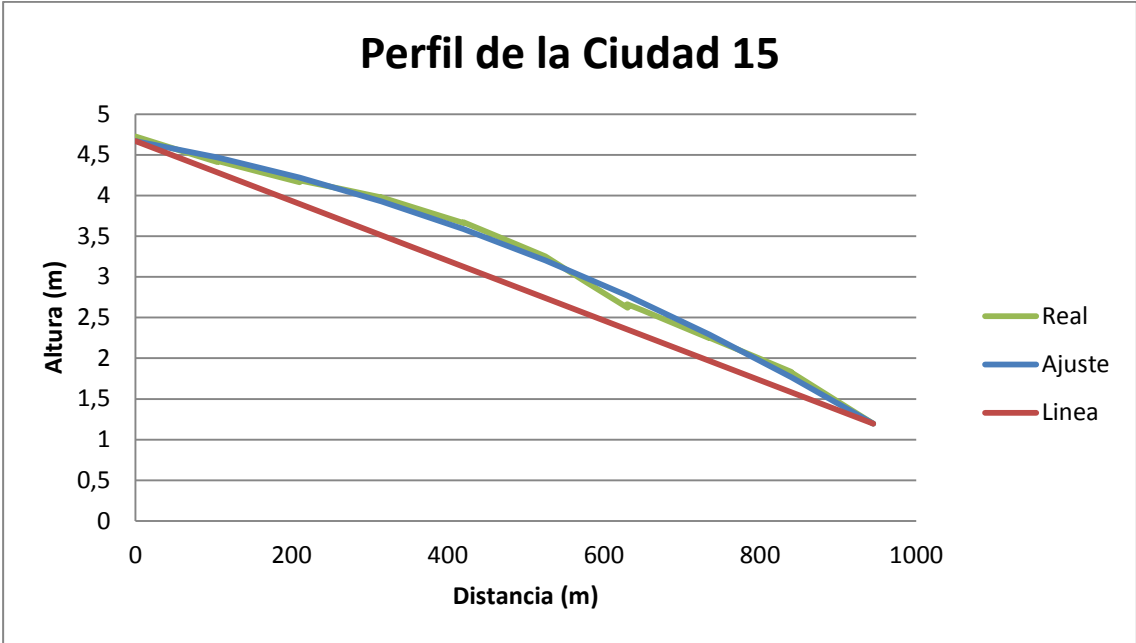


Figura 7.23. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 15.

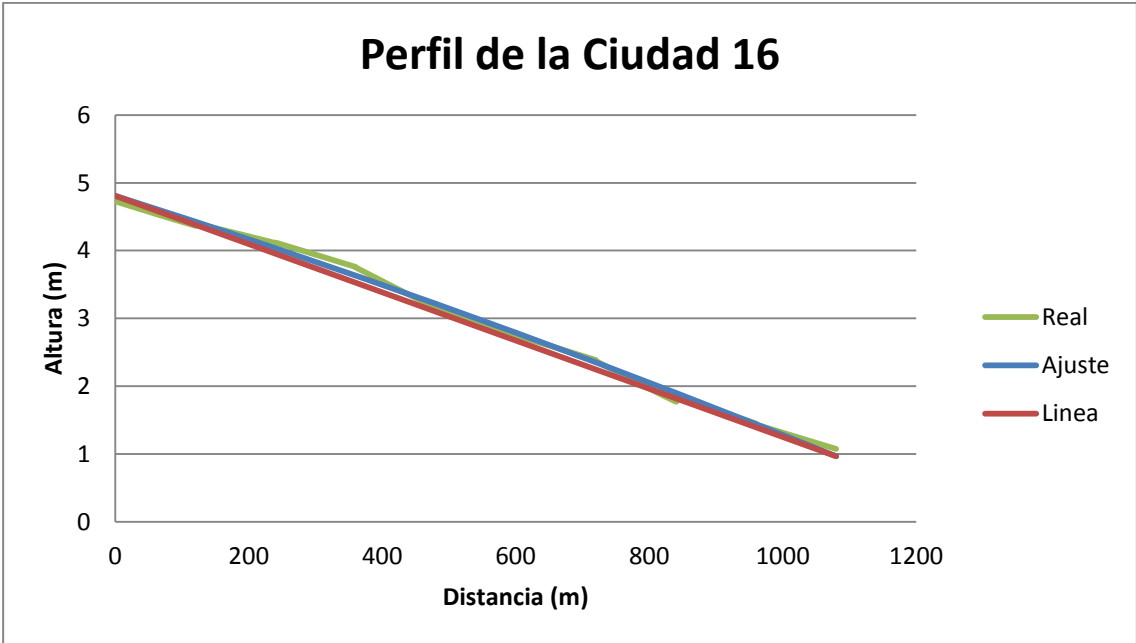


Figura 7.24. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 16.

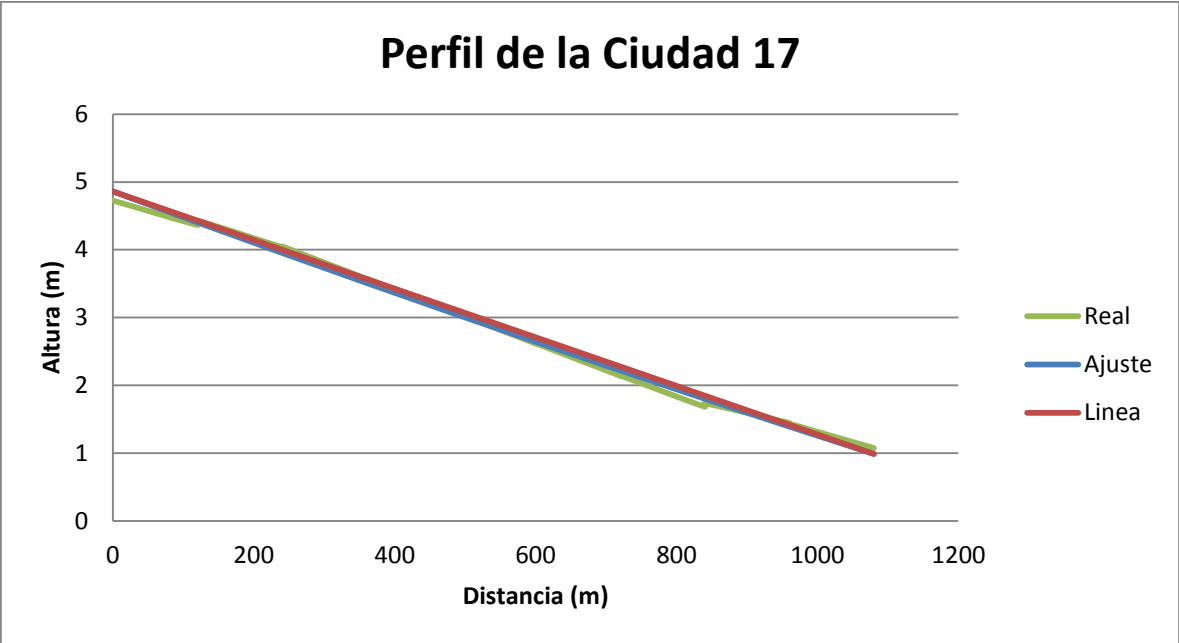


Figura 7.25. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 17.

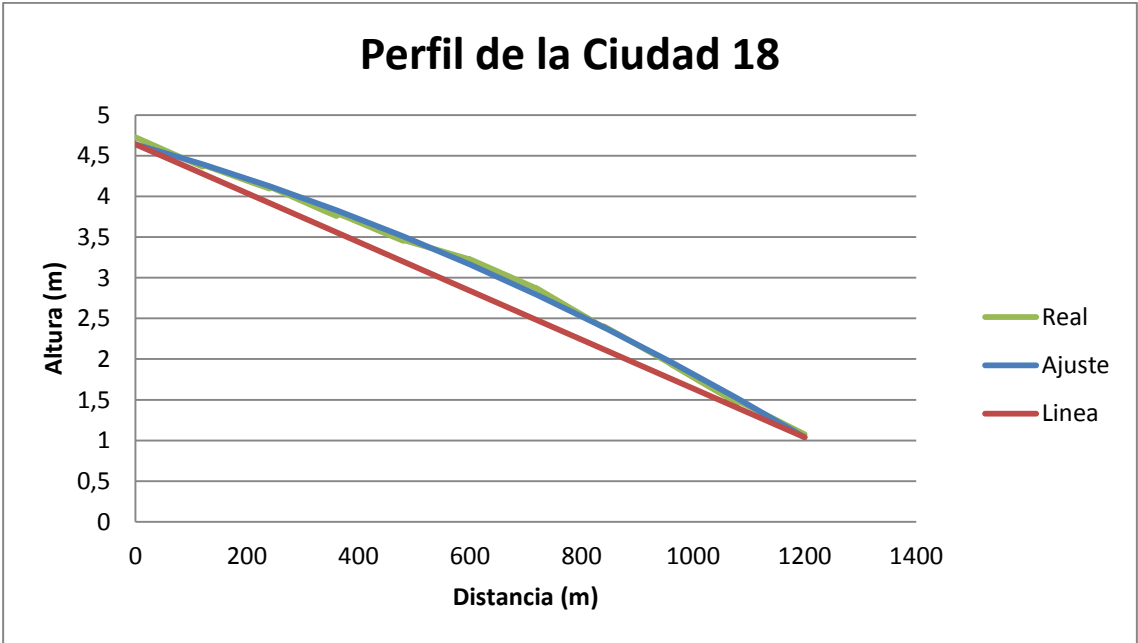


Figura 7.26. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 18.

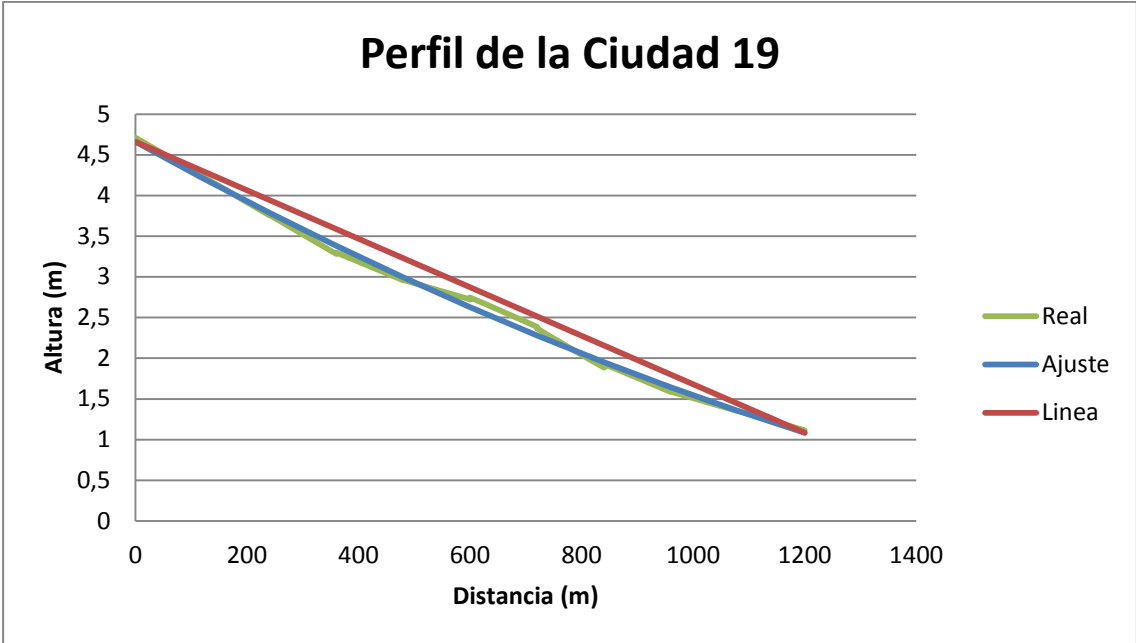


Figura 7.27. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 19.

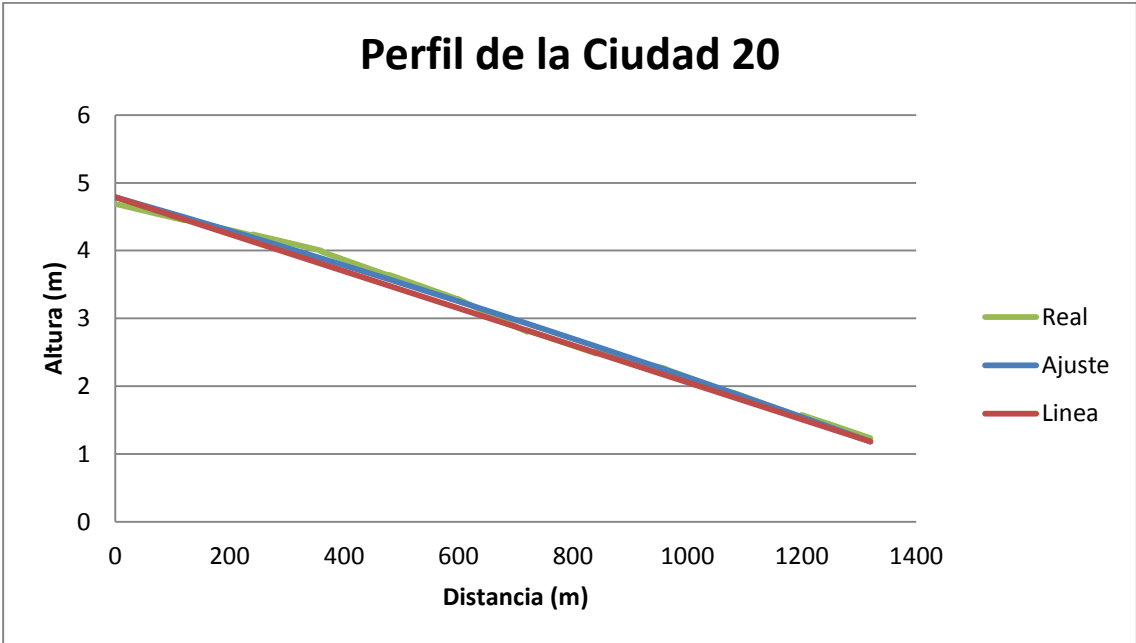


Figura 7.28. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 20.

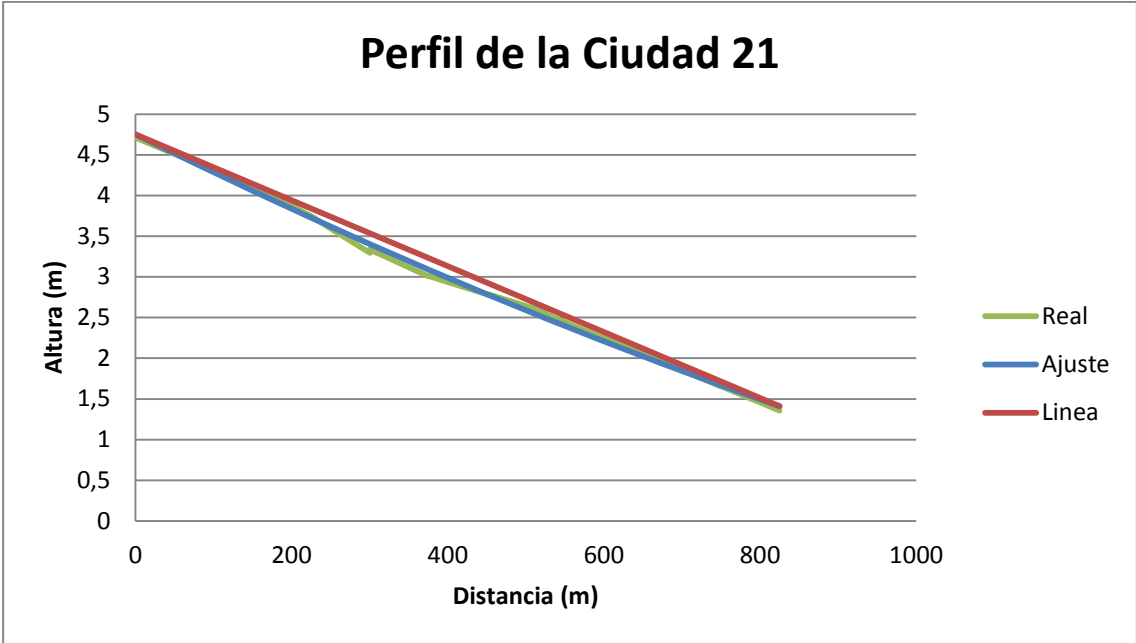


Figura 7.29. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 21.

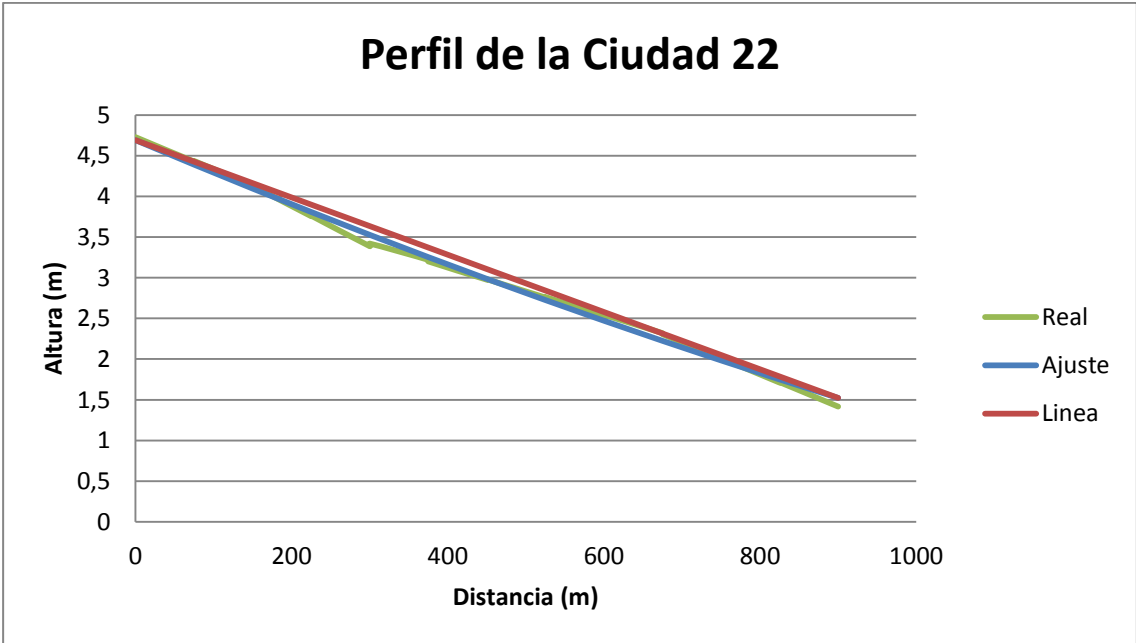


Figura 7.30. Regresión polinómica de segundo grado para el perfil hidráulico de la Ciudad # 22.

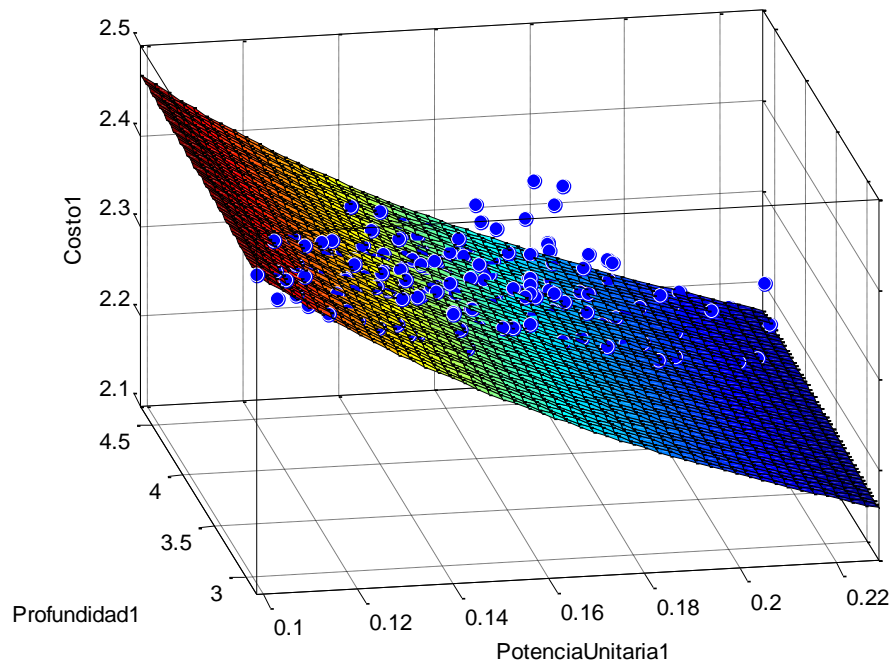


Figura 7.31. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 1.

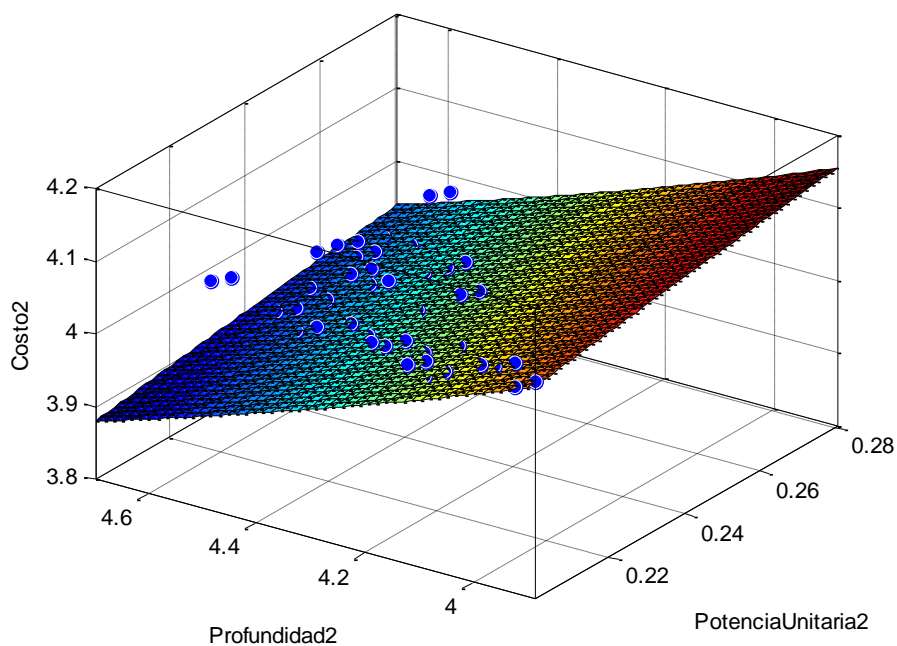


Figura 7.32. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 2.

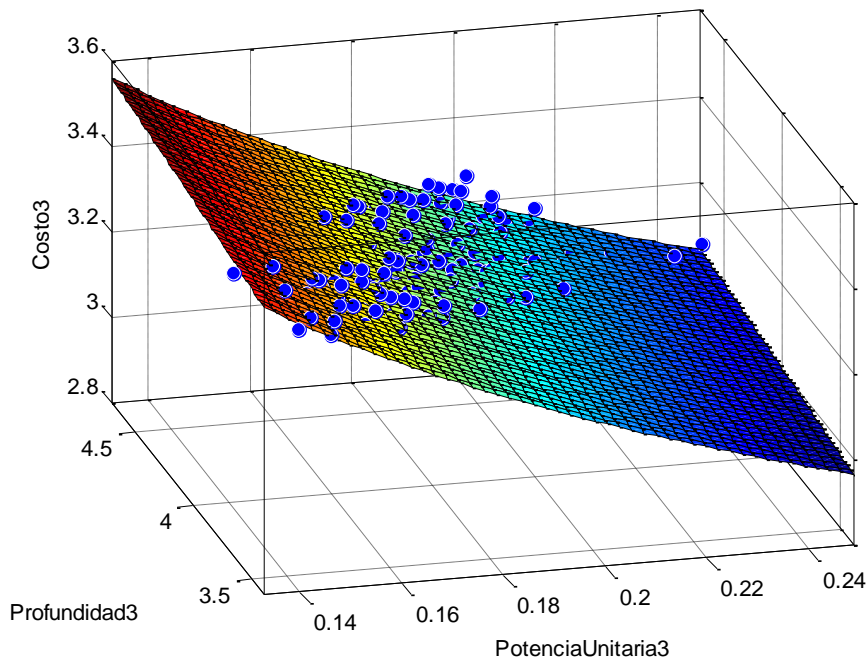


Figura 7.33. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 3.

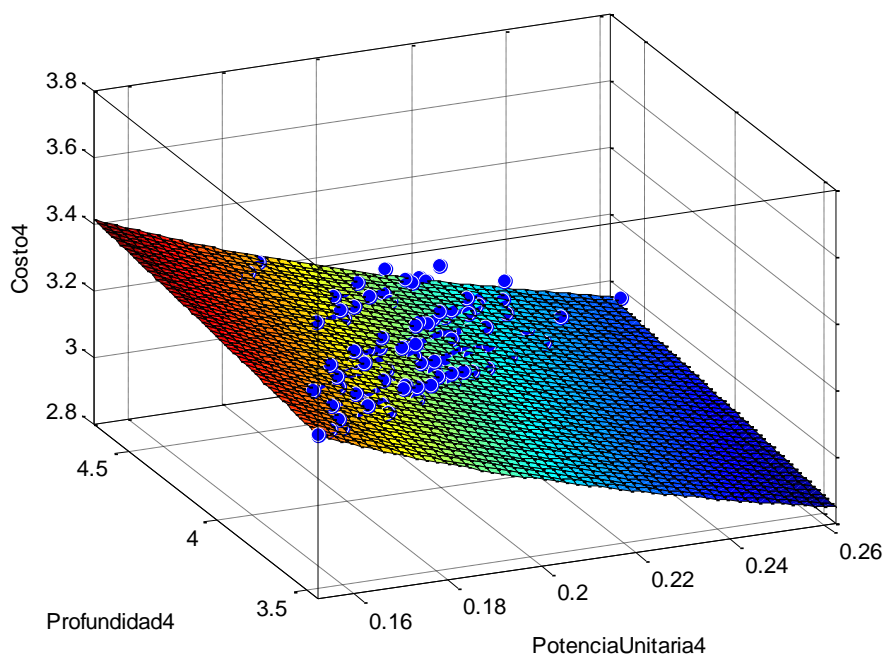


Figura 7.34. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 4.

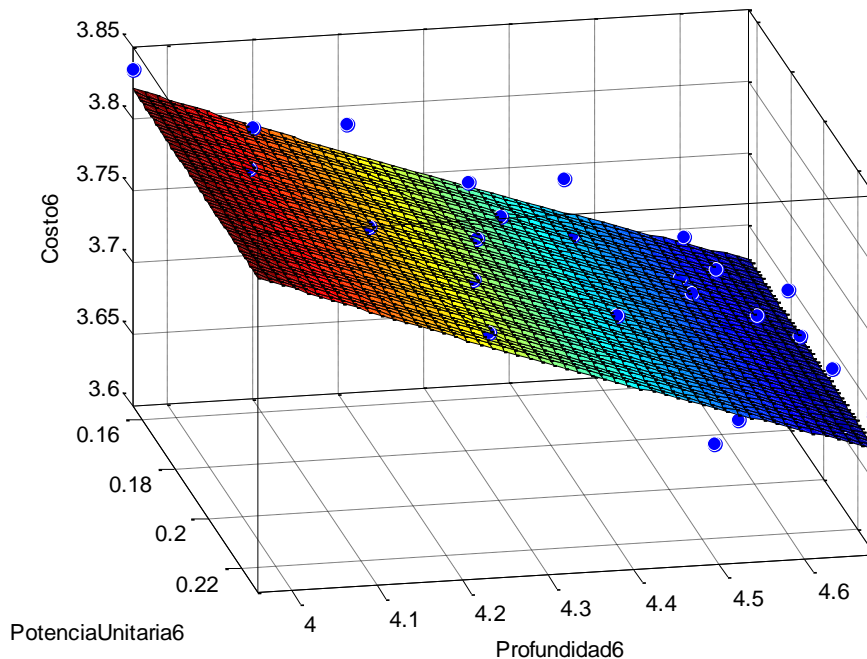


Figura 7.35. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 6.

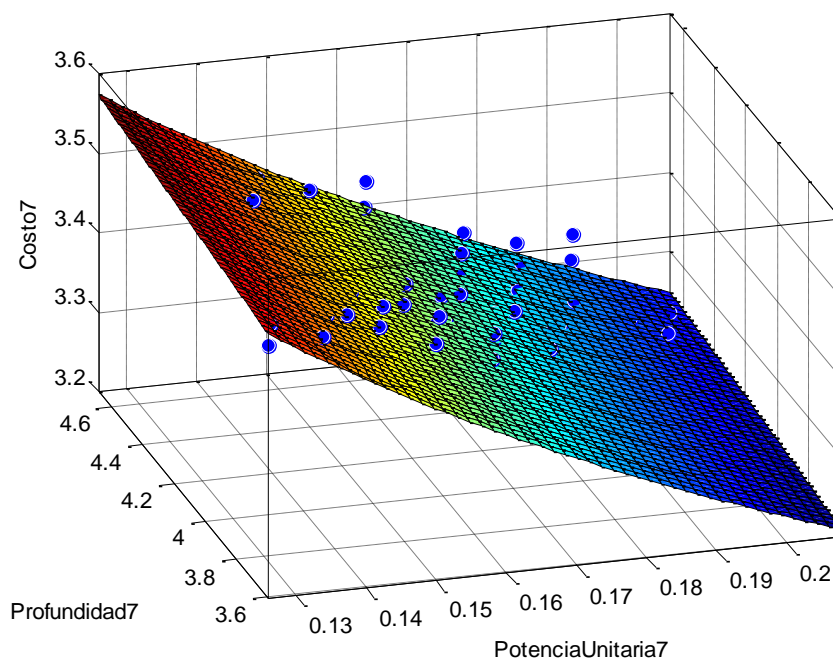


Figura 7.36. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 7.

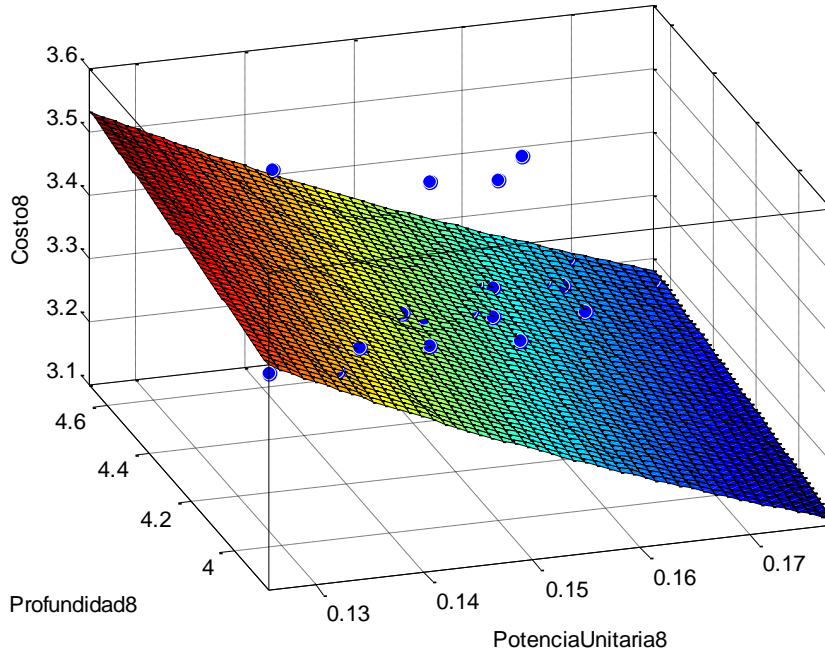


Figura 7.37. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 8.

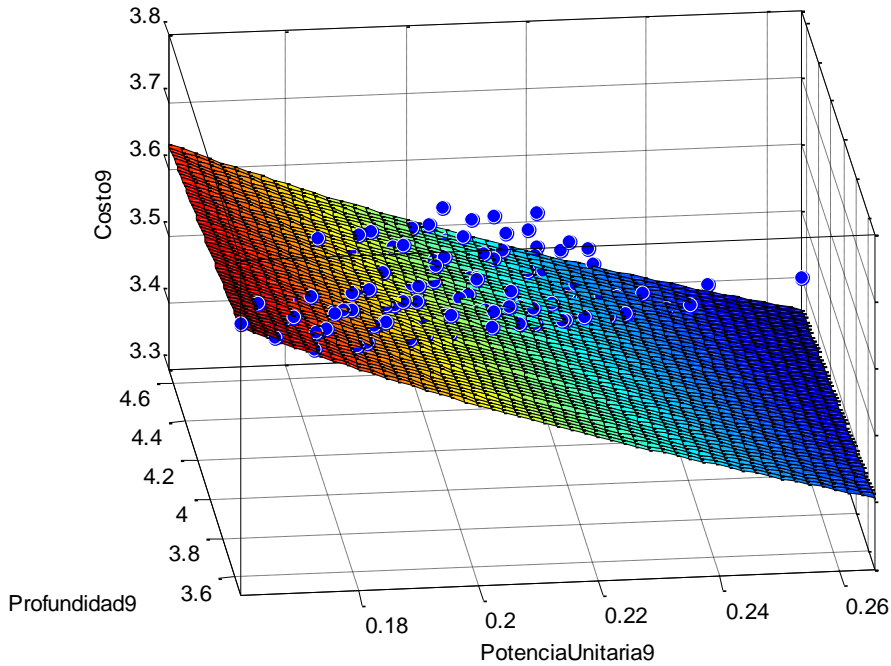


Figura 7.38. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 9.

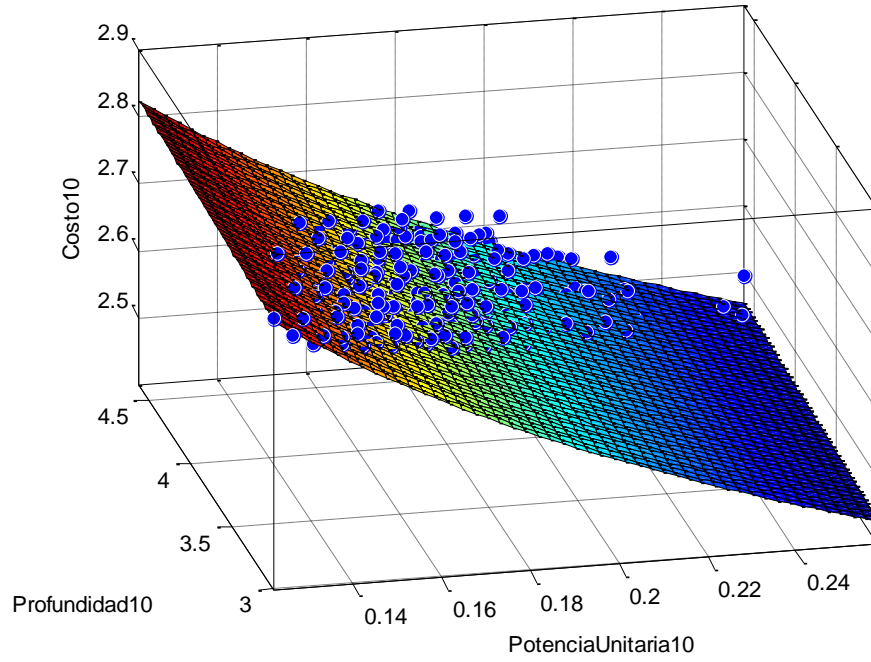


Figura 7.39. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 10.

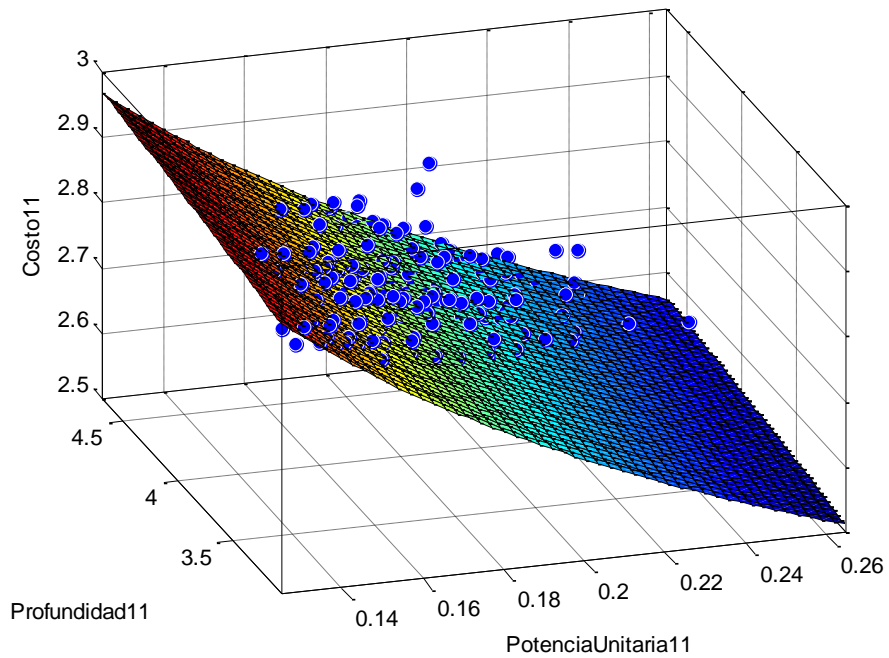


Figura 7.40. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 11.

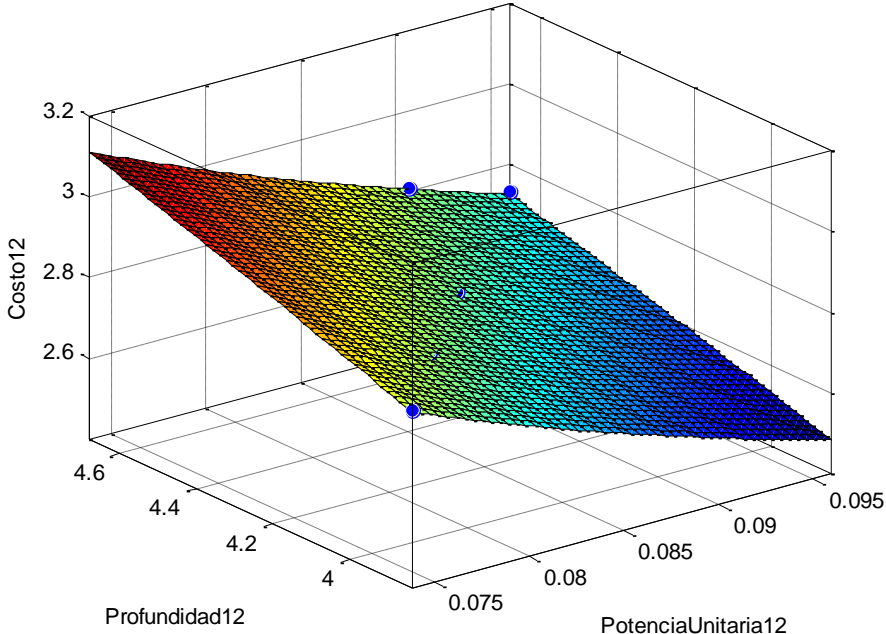


Figura 7.41. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 12.

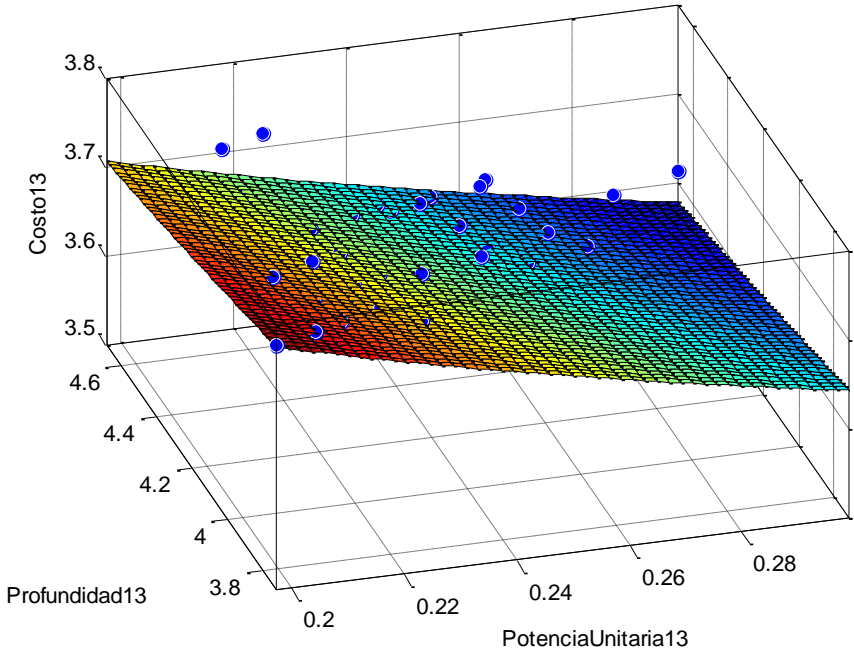


Figura 7.42. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 13.

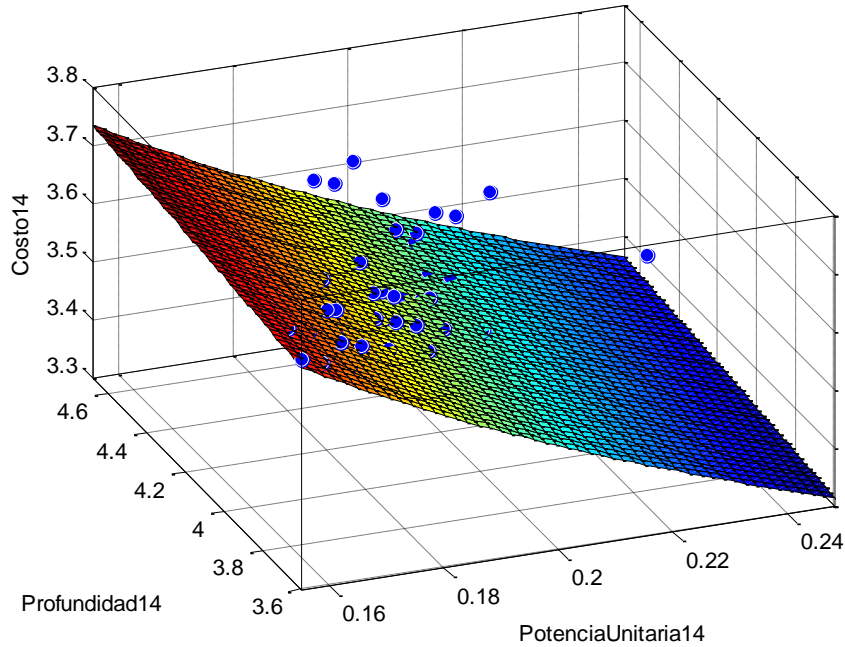


Figura 7.43. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 14.

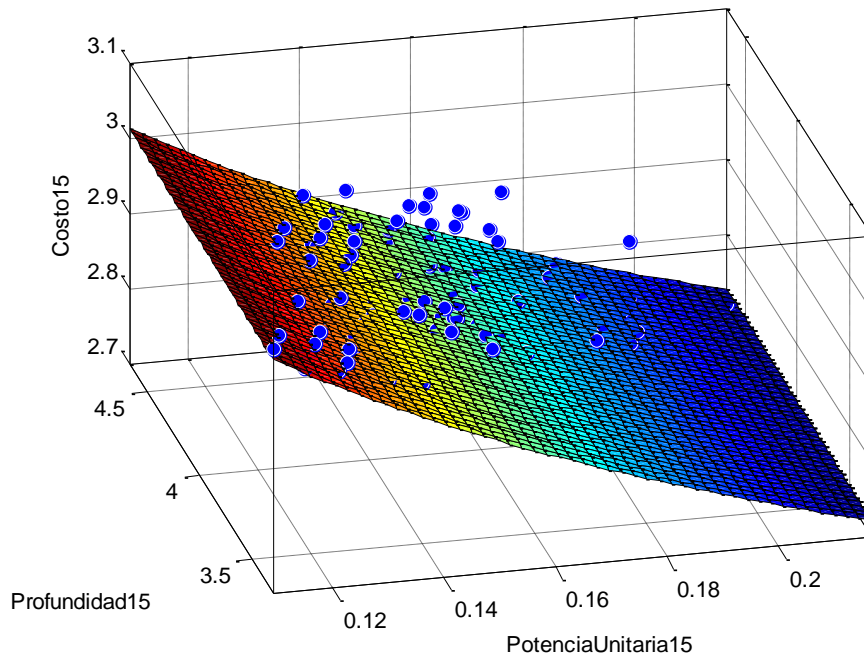


Figura 7.44. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 15.

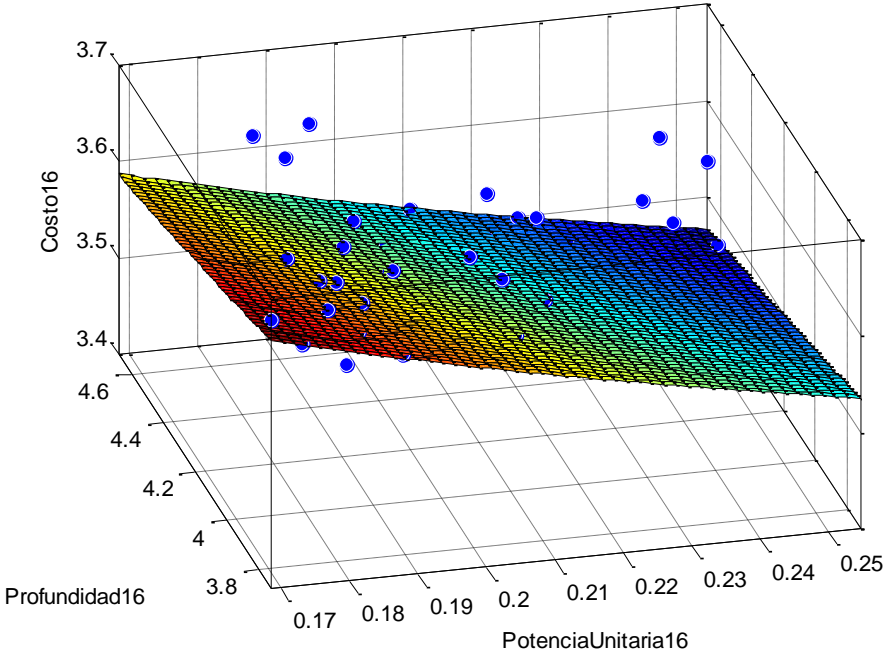


Figura 7.45. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 16.

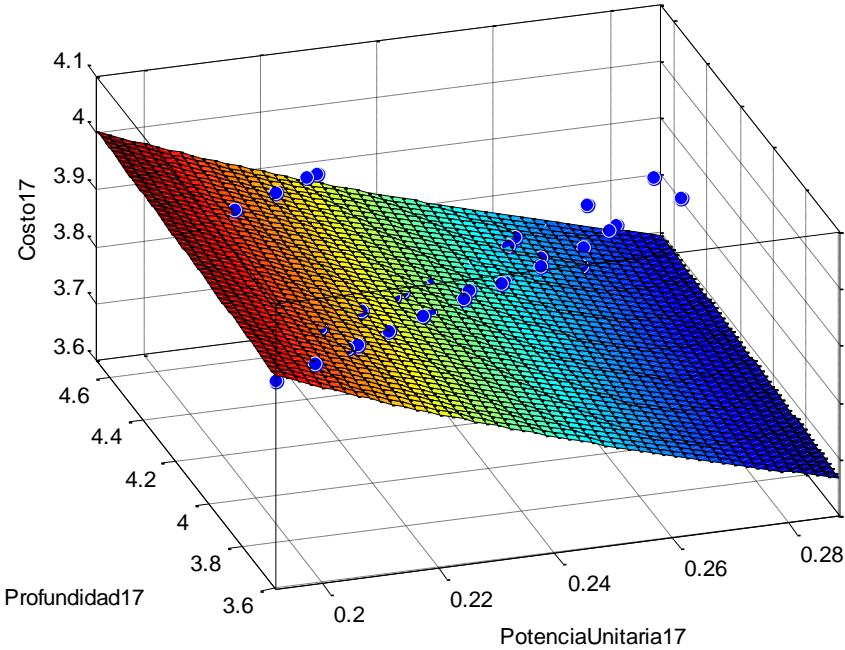


Figura 7.46. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 17.

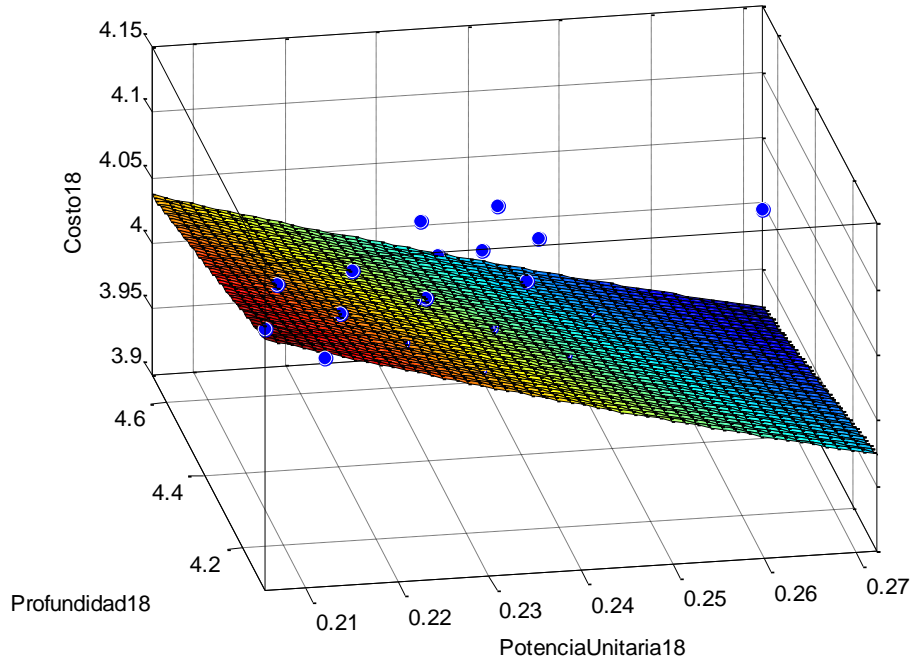


Figura 7.47. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 18.

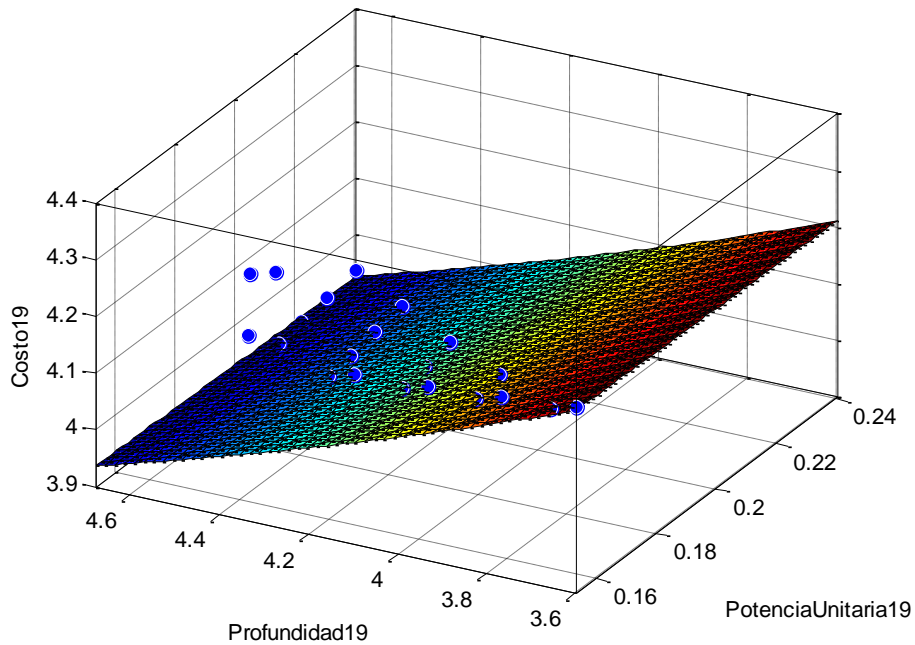


Figura 7.48. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 19.

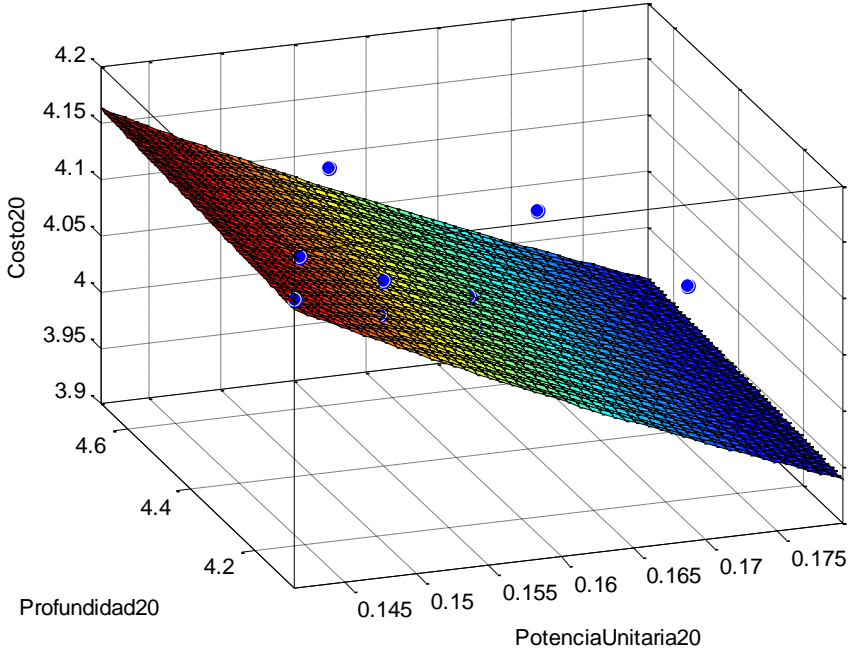


Figura 7.49. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 20.

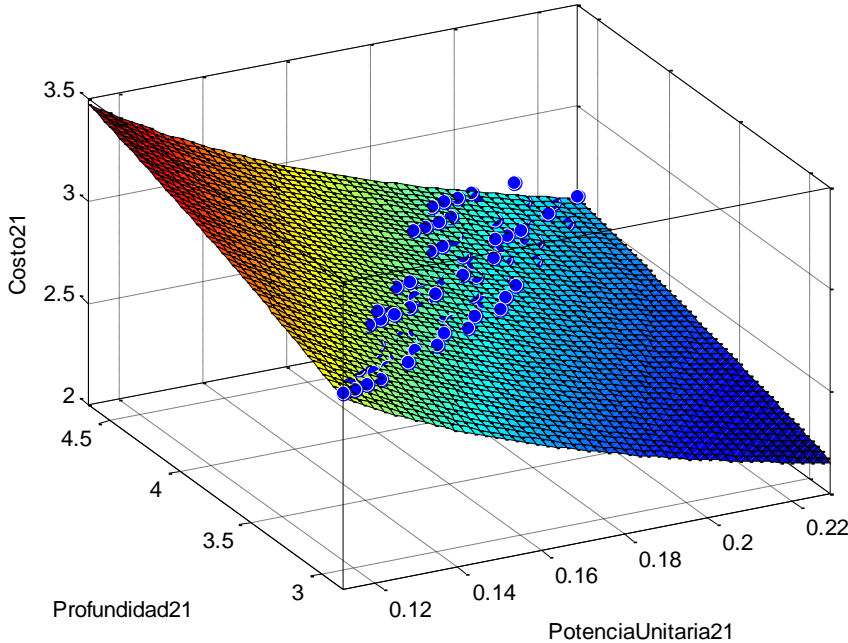


Figura 7.50. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 21.

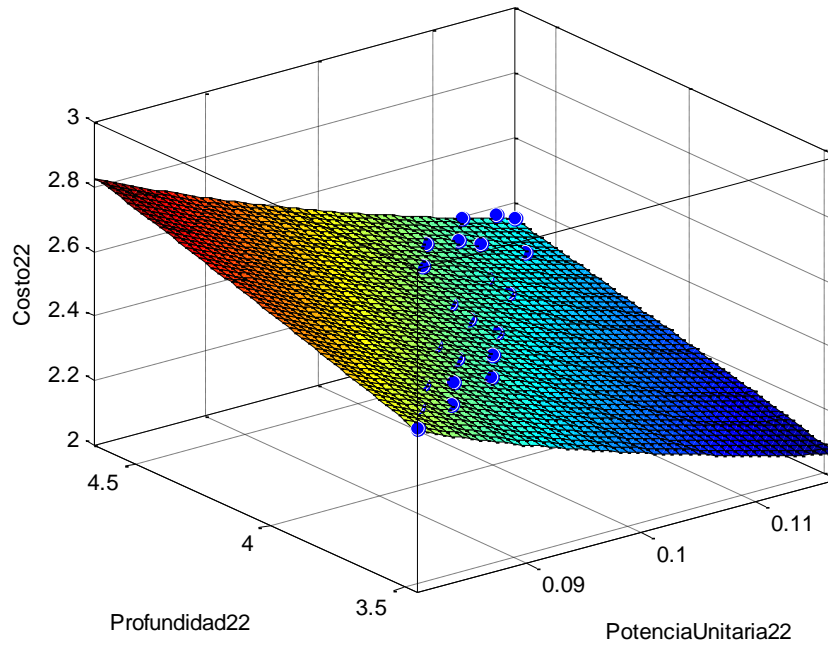


Figura 7.51. Regresión potencial multivariada de la Ciudad # 22.