

TESIS DE MAESTRÍA

**COMPARACIÓN ENTRE DISEÑOS DE RDUs PRESENTADOS EN EL
MECANISMO DE VIABILIZACIÓN DE PROYECTOS DEL MVCT Y LOS
DISEÑOS OPTIMIZADOS DE LAS MISMAS REDES**

María Andrea Mendoza Orduz

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2019**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la fuerza, la salud y mantener viva la fe,

A mis padres Martha y Oscar por su apoyo incondicional y por siempre creer más en
mis capacidades que yo misma,

A mis amigos César, Xilena, Mariela y Juri porque a pesar de la distancia su apoyo y
amor nunca me faltó,

A Andrés Aguilar por su guiarme y colaborarme siempre,

A mis compañeros por la complicidad y compañía en este camino,

A mi Asesor Juan Saldarriaga por sus aportes y dirección,

A todos los que alguna vez me dieron una palabra de aliento.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	General	2
1.1.2	Específicos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Sistemas de alcantarillado en Colombia	3
2.1.1	Ventanilla Única	4
2.2	Optimización en diseños de redes de alcantarillado	5
2.3	Ecuaciones de costo	7
2.3.1	Ecuación de Marchionni	7
2.3.2	Ecuación de Maurer	8
2.3.3	Ecuación de Moeini	9
2.3.4	Ecuación de Salcedo	10
2.3.5	Ecuación de Peinado	13
2.4	Restricciones hidráulicas	16
3	Metodología	18
3.1	Base de datos	18
3.2	Selección de Ecuaciones de diseño	19
3.3	Archivos de entrada para UTOPÍA	19
4	Resultados	21
4.1	Red San Luis	22
4.2	Red El Encano	26
4.3	Red El Molino	31
4.4	Red San Ignacio	36
4.5	Red La Peña	40
4.6	Red El Retén	45

4.7	Red Sibaté.....	50
4.8	Red Apulo	54
4.9	Red Beltrán.....	58
4.9.1	Colector 1 – Red Beltrán.....	58
4.9.2	Colector 2 – Red Beltrán.....	62
4.9.3	Colector 3 – Red Beltrán.....	67
4.9.4	Colector 4 – Red Beltrán.....	70
4.10	Red Soacha	74
4.10.1	Colector 1 – Red Soacha.....	75
4.10.2	Colector 2 – Red Soacha.....	78
4.10.3	Colector 3 – Red Soacha.....	82
4.10.4	Colector 4 – Red Soacha.....	85
4.10.5	Colector 5 – Red Soacha.....	88
4.10.6	Colector 6 – Red Soacha.....	92
4.10.7	Colector 7 – Red Soacha.....	94
4.10.8	Colector 8 – Red Soacha.....	98
4.11	Red Guáimaro.....	102
4.12	Red Concordia	106
4.12.1	Sector norte – Red Concordia	107
4.12.2	Sector sur – Red Concordia	110
4.13	Red Caracolí.....	115
4.14	Red La Junta	118
4.15	Resumen de resultados.....	124
5	Análisis de resultados.....	126
6	Conclusiones.....	130
7	Recomendaciones	132
8	Referencias.....	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Cobertura nacional de alcantarillado (2002 - 2013). Con soluciones alternativas (DNP, 2013) ...	4
Ilustración 2. Metodología de optimización UTOPIA. (Aguilar, 2016)	7
Ilustración 3. Ejemplo de archivo de entrada a UTOPIA.....	19
Ilustración 4. Topología de la red San Luis	22
Ilustración 5. Topología de la red El Encano.....	26
Ilustración 6. Topología de la red El Molino	31
Ilustración 7. Topología de la red San Ignacio	36
Ilustración 8. Topología de la red La Peña.....	40
Ilustración 9. Topología de la red El Retén	45
Ilustración 10. Topología de la red Sibaté	50
Ilustración 11. Topología de la red Apulo.....	54
Ilustración 12. Topología de la red Beltrán	58
Ilustración 13. Topología de la red Soacha.....	74
Ilustración 14. Topología de la red Guáimaro	102
Ilustración 15. Topología de la red Concordia.....	106
Ilustración 16. Topología de la red Caracolí	115
Ilustración 17. Topología de la red La Junta	119

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Peso porcentual de cada ítem sobre el costo total de la red. Ecuación Salcedo	13
Gráfica 2. Peso porcentual de cada ítem sobre el costo total de la red. Ecuación Peinado.....	15
Gráfica 3. Recubrimiento de excavación promedio diseño inicial según el límite mínimo. Red San Luis	23
Gráfica 4. Diámetros internos de diseño inicial red San Luis.....	23
Gráfica 5. Valores del recubrimiento de la red San Luis.....	24
Gráfica 6. Valores de la profundidad de excavación de la red San Luis	25
Gráfica 7. Valores de la velocidad de diseño de la red San Luis	25
Gráfica 8. Valores de la relación de llenado de la red San Luis	25
Gráfica 9. Valores del esfuerzo cortante de la red San Luis	26
Gráfica 10. Recubrimiento de excavación promedio del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Encano	27
Gráfica 11. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Encano	27
Gráfica 12. Diámetros internos de diseño inicial red El Encano	28
Gráfica 13. Valores del recubrimiento de la red El Encano	29
Gráfica 14. Valores de la profundidad de excavación de la red El Encano.....	29
Gráfica 15. Valores de la velocidad de diseño de la red El Encano	30
Gráfica 16. Valores de la relación de llenado de la red El Encano.....	30
Gráfica 17. Valores del esfuerzo cortante de la red El Encano.....	30
Gráfica 18. Velocidad del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino	31
Gráfica 19. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino.....	32
Gráfica 20. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino.....	32
Gráfica 21. Diámetros internos de diseño inicial red El Molino	33
Gráfica 22. Valores del recubrimiento de la red El Molino	34
Gráfica 23. Valores de la profundidad de excavación de la red El Molino	34
Gráfica 24. Valores de la velocidad de diseño de la red El Molino.....	35
Gráfica 25. Valores de la relación de llenado de la red El Molino	35
Gráfica 26. Valores del esfuerzo cortante de la red El Molino	35

Gráfica 27. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red San Ignacio	36
Gráfica 28. Diámetros internos de diseño inicial red San Ignacio	37
Gráfica 29. Valores del recubrimiento de la red San Ignacio	38
Gráfica 30. Valores de la profundidad de excavación de la red San Ignacio	38
Gráfica 31. Valores de la velocidad de diseño de la red San Ignacio.....	39
Gráfica 32. Valores de la relación de llenado de la red San Ignacio	39
Gráfica 33. Valores del esfuerzo cortante de la red San Ignacio	39
Gráfica 34. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña .	40
Gráfica 35. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña	41
Gráfica 36. Relación de llenado de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña	41
Gráfica 37. Diámetros internos de diseño inicial red La Peña	42
Gráfica 38. Valores del recubrimiento de la red La Peña	43
Gráfica 39. Valores de la profundidad de excavación de la red La Peña	43
Gráfica 40. Valores de la velocidad de diseño de la red La Peña	44
Gráfica 41. Valores de la relación de llenado de la red La Peña.....	44
Gráfica 42. Valores del esfuerzo cortante de la red La Peña.....	44
Gráfica 43. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén .	45
Gráfica 44. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén	46
Gráfica 45. Velocidad de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén	46
Gráfica 46. Diámetros internos de diseño inicial red El Retén	47
Gráfica 47. Valores del recubrimiento de la red El Retén	48
Gráfica 48. Valores de la profundidad de excavación de la red El Retén	48
Gráfica 49. Valores de la velocidad de diseño de la red El Retén.....	49
Gráfica 50. Valores de la relación de llenado de la red El Retén	49
Gráfica 51. Valores del esfuerzo cortante de la red El Retén	49
Gráfica 52. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Sibaté	51
Gráfica 53. Diámetros internos de diseño inicial red Sibaté	51
Gráfica 54. Valores del recubrimiento de la red Sibaté.....	52
Gráfica 55. Valores de la profundidad de excavación de la red Sibaté	53

Gráfica 56. Valores de la velocidad de diseño de la red Sibaté	53
Gráfica 57. Valores de la relación de llenado de la red Sibaté	53
Gráfica 58. Valores del esfuerzo cortante de la red Sibaté	54
Gráfica 59. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Apulo	55
Gráfica 60. Valores del recubrimiento de la red Apulo	56
Gráfica 61. Valores de la profundidad de excavación de la Apulo	56
Gráfica 62. Valores de la velocidad de diseño de la red Apulo	57
Gráfica 63. Valores de la relación de llenado de la red Apulo.....	57
Gráfica 64. Valores del esfuerzo cortante de la red Apulo.....	57
Gráfica 65. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 1 - Red Beltrán	59
Gráfica 66. Diámetros internos de diseño inicial Colector 1 - Red Beltrán	59
Gráfica 67. Valores del recubrimiento del Colector 1 - Red Beltrán	60
Gráfica 68. Valores de la profundidad de excavación del Colector 1 - Red Beltrán	61
Gráfica 69. Valores de la velocidad de diseño del Colector 1 - Red Beltrán.....	61
Gráfica 70. Valores de la relación de llenado del Colector 1 - Red Beltrán	61
Gráfica 71. Valores del esfuerzo cortante del Colector 1 - Red Beltrán	62
Gráfica 72. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Beltrán	62
Gráfica 73. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Beltrán.....	63
Gráfica 74. Profundidad de excavación según el límite máximo. Colector 2 - Red Beltrán	63
Gráfica 75. Diámetros internos de diseño inicial Colector 2 - Red Beltrán	64
Gráfica 76. Valores del recubrimiento del Colector 2 - Red Beltrán	65
Gráfica 77. Valores de la profundidad de excavación del Colector 2 - Red Beltrán	65
Gráfica 78. Valores de la velocidad de diseño del Colector 2 - Red Beltrán.....	66
Gráfica 79. Valores de la relación de llenado del Colector 2 - Red Beltrán	66
Gráfica 80. Valores del esfuerzo cortante del Colector 2 - Red Beltrán	66
Gráfica 81. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 3 - Red Beltrán	67
Gráfica 82. Diámetros internos de diseño inicial Colector 3 - Red Beltrán	67
Gráfica 83. Valores del recubrimiento del Colector 3 - Red Beltrán	69

Gráfica 84. Valores de la profundidad de excavación del Colector 3 - Red Beltrán	69
Gráfica 85. Valores de la velocidad de diseño del Colector 3 - Red Beltrán	69
Gráfica 86. Valores de la relación de llenado del Colector 3 - Red Beltrán	70
Gráfica 87. Valores del esfuerzo cortante del Colector 3 - Red Beltrán	70
Gráfica 88. Diámetros internos de diseño inicial Colector 4 - Red Beltrán	71
Gráfica 89. Valores del recubrimiento del Colector 4 - Red Beltrán	72
Gráfica 90. Valores de la profundidad de excavación del Colector 4 - Red Beltrán	72
Gráfica 91. Valores de la velocidad de diseño del Colector 4 - Red Beltrán	73
Gráfica 92. Valores de la relación de llenado del Colector 4 - Red Beltrán	73
Gráfica 93. Valores del esfuerzo cortante del Colector 4 - Red Beltrán	73
Gráfica 94. Diámetros internos de diseño inicial red Soacha	75
Gráfica 95. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 1 - Red Soacha.....	75
Gráfica 96. Valores del recubrimiento del Colector 1 - Red Soacha.....	77
Gráfica 97. Valores de la profundidad de excavación del Colector 1 - Red Soacha	77
Gráfica 98. Valores de la velocidad de diseño del Colector 1 - Red Soacha	77
Gráfica 99. Valores de la relación de llenado del Colector 1 - Red Soacha	78
Gráfica 100. Valores del esfuerzo cortante del Colector 1 - Red Soacha	78
Gráfica 101. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Soacha	79
Gráfica 102. Valores del recubrimiento del Colector 2 - Red Soacha.....	80
Gráfica 103. Valores de la profundidad de excavación del Colector 2 - Red Soacha	80
Gráfica 104. Valores de la velocidad de diseño del Colector 2 - Red Soacha	81
Gráfica 105. Valores de la relación de llenado del Colector 2 - Red Soacha	81
Gráfica 106. Valores del esfuerzo cortante del Colector 2 - Red Soacha	81
Gráfica 107. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 3 - Red Soacha	82
Gráfica 108. Valores del recubrimiento del Colector 3 - Red Soacha.....	83
Gráfica 109. Valores de la profundidad de excavación del Colector 3 - Red Soacha	84
Gráfica 110. Valores de la velocidad de diseño del Colector 3 - Red Soacha	84
Gráfica 111. Valores de la relación de llenado del Colector 3 - Red Soacha	84

Gráfica 112. Valores del esfuerzo cortante del Colector 3 - Red Soacha	85
Gráfica 113. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 4 - Red Soacha	85
Gráfica 114. Valores del recubrimiento del Colector 4 - Red Soacha.....	87
Gráfica 115. Valores de la profundidad de excavación del Colector 4 - Red Soacha	87
Gráfica 116. Valores de la velocidad de diseño del Colector 4 - Red Soacha	87
Gráfica 117. Valores de la relación de llenado del Colector 4 - Red Soacha	88
Gráfica 118. Valores del esfuerzo cortante del Colector 4 - Red Soacha	88
Gráfica 119. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 5 - Red Soacha	89
Gráfica 120. Valores del recubrimiento del Colector 5 - Red Soacha.....	90
Gráfica 121. Valores de la profundidad de excavación del Colector 5 - Red Soacha	90
Gráfica 122. Valores de la velocidad de diseño del Colector 5 - Red Soacha	91
Gráfica 123. Valores de la relación de llenado del Colector 5 - Red Soacha	91
Gráfica 124. Valores del esfuerzo cortante del Colector 5 - Red Soacha	91
Gráfica 125. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 6 - Red Soacha	92
Gráfica 126. Valores del recubrimiento del Colector 6 - Red Soacha.....	93
Gráfica 127. Valores de la profundidad de excavación del Colector 6 - Red Soacha	93
Gráfica 128. Valores de la relación de llenado del Colector 6 - Red Soacha	94
Gráfica 129. Valores del esfuerzo cortante del Colector 6 - Red Soacha	94
Gráfica 130. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 7 - Red Soacha	95
Gráfica 131. Valores del recubrimiento del Colector 7 - Red Soacha.....	96
Gráfica 132. Valores de la profundidad de excavación del Colector 7 - Red Soacha	96
Gráfica 133. Valores de la velocidad de diseño del Colector 7 - Red Soacha	97
Gráfica 134. Valores de la relación de llenado del Colector 7 - Red Soacha	97
Gráfica 135. Valores del esfuerzo cortante del Colector 7 - Red Soacha	97
Gráfica 136. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 8 - Red Soacha	98
Gráfica 137. Profundidad de excavación de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 8 - Red Soacha..	98

Gráfica 138	Valores del recubrimiento del Colector 8 - Red Soacha.....	100
Gráfica 139.	Valores de la profundidad de excavación del Colector 8 - Red Soacha	100
Gráfica 140.	Valores de la velocidad de diseño del Colector 8 - Red Soacha	100
Gráfica 141.	Valores de la relación de llenado del Colector 8 - Red Soacha	101
Gráfica 142.	Valores del esfuerzo cortante del Colector 8 - Red Soacha	101
Gráfica 143.	Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Guáimaro	102
Gráfica 144.	Diámetros internos de diseño inicial red Guáimaro	103
Gráfica 145.	Valores del recubrimiento de la red Guáimaro.....	104
Gráfica 146.	Valores de la profundidad de excavación de la red Guáimaro	104
Gráfica 147.	Valores de la velocidad de diseño de la red Guáimaro	105
Gráfica 148.	Valores de la relación de llenado de la red Guáimaro	105
Gráfica 149.	Valores del esfuerzo cortante de la red Guáimaro	105
Gráfica 150.	Diámetros internos de diseño inicial red Concordia	106
Gráfica 151.	Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Sector norte - Red Concordia.....	107
Gráfica 152.	Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector norte - Red Concordia	107
Gráfica 153.	Valores del recubrimiento del Sector norte - Red Concordia	109
Gráfica 154.	Valores de la profundidad de excavación del Sector norte - Red Concordia	109
Gráfica 155.	Valores de la velocidad de diseño del Sector norte - Red Concordia.....	109
Gráfica 156.	Valores de la relación de llenado del Sector norte - Red Concordia.....	110
Gráfica 157.	Valores del esfuerzo cortante del Sector norte - Red Concordia.....	110
Gráfica 158.	Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia.....	111
Gráfica 159.	Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia	111
Gráfica 160.	Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia	112
Gráfica 161.	Valores del recubrimiento del Sector sur - Red Concordia	113
Gráfica 162.	Valores de la profundidad de excavación del Sector sur - Red Concordia.....	113
Gráfica 163.	Valores de la velocidad de diseño del Sector sur - Red Concordia	114
Gráfica 164	Valores de la relación de llenado del Sector sur - Red Concordia.....	114
Gráfica 165.	Valores del esfuerzo cortante del Sector sur - Red Concordia.....	114

Gráfica 166. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Caracolí	115
Gráfica 167. Valores del recubrimiento de la red Caracolí.....	117
Gráfica 168. Valores de la profundidad de excavación de la red Caracolí	117
Gráfica 169. Valores de la velocidad de diseño de la red Caracolí	117
Gráfica 170. Valores de la relación de llenado de la red Caracolí	118
Gráfica 171. Valores del esfuerzo cortante de la red Caracolí	118
Gráfica 172. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Junta	119
Gráfica 173. Profundidad de excavación promedio de diseño inicial según el límite máximo. Red La Junta	120
Gráfica 174. Relación de llenado de diseño inicial según el límite máximo. Red La Junta	120
Gráfica 175. Diámetros internos de diseño inicial red La Junta	121
Gráfica 176. Valores del recubrimiento de la red La Junta	122
Gráfica 177. Valores de la profundidad de excavación de la red La Junta	122
Gráfica 178. Valores de la velocidad de diseño de la red La Junta	123
Gráfica 179. Valores de la relación de llenado de la red La Junta	123
Gráfica 180. Valores del esfuerzo cortante de la red La Junta	123
Gráfica 181. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Maurer (2010).	124
Gráfica 182. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Moeini (2012).	124
Gráfica 183. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Salcedo (2012).	125
Gráfica 184. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Peinado (2016).	125
Gráfica 185. Valor porcentual de la diferencia de costo de las redes	127
Gráfica 186. Relación entre variación porcentual de costos per cápita y # de habitantes.	128
Gráfica 187. Relación entre variación porcentual de costos por unidad de caudal y caudal de descarga.....	128
Gráfica 188. Relación entre variación porcentual de costos por unidad de tuberías y # de tuberías.	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de diseño como restricciones hidráulicas	17
Tabla 2. Información necesaria de las redes para crear archivo <i>.inp</i>	18
Tabla 3. Identificación de los proyectos de la base de datos	21
Tabla 4. Costos de la red San Luis con las diferentes ecuaciones	23
Tabla 5. Parámetros hidráulicos de la red San Luis	24
Tabla 6. Costos de la red El Encano con las diferentes ecuaciones	28
Tabla 7. Parámetros hidráulicos de la red El Encano.....	28
Tabla 8. Costos de la red El Molino con las diferentes ecuaciones	33
Tabla 9. Parámetros hidráulicos de la red El Molino.....	33
Tabla 10. Costos de la red San Ignacio con las diferentes ecuaciones	37
Tabla 11. Parámetros hidráulicos de la red San Ignacio.....	37
Tabla 12. Costos de la red La Peña con las diferentes ecuaciones	42
Tabla 13. Parámetros hidráulicos de la red La Peña.....	42
Tabla 14. Costos de la red El Retén con las diferentes ecuaciones	47
Tabla 15. Parámetros hidráulicos de la red El Retén.....	47
Tabla 16. Costos de la red Sibaté con las diferentes ecuaciones	51
Tabla 17. Parámetros hidráulicos de la red Sibaté	52
Tabla 18. Costos de la red Apulo con las diferentes ecuaciones	55
Tabla 19. Parámetros hidráulicos de la red Apulo.....	55
Tabla 20. Costos del Colector 1 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones	59
Tabla 21. Parámetros hidráulicos del Colector 1 - Red Beltrán	60
Tabla 22. Costos del Colector 2 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones	64
Tabla 23. Parámetros hidráulicos del Colector 2 - Red Beltrán	64
Tabla 24. Costos del Colector 3 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones	68
Tabla 25. Parámetros hidráulicos del Colector 3 - Red Beltrán	68
Tabla 26. Costos del Colector 4 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones	71
Tabla 27. Parámetros hidráulicos del Colector 4 - Red Beltrán	71
Tabla 28. Costos de la red Beltrán con las diferentes ecuaciones.....	74

Tabla 29. Costos del Colector 1 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	75
Tabla 30. Parámetros hidráulicos del Colector 1- Red Soacha	76
Tabla 31. Costos del Colector 2 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	79
Tabla 32. Parámetros hidráulicos del Colector 2- Red Soacha	79
Tabla 33. Costos del Colector 3 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	82
Tabla 34. Parámetros hidráulicos del Colector 3- Red Soacha	82
Tabla 35. Costos del Colector 4 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	85
Tabla 36. Parámetros hidráulicos del Colector 4- Red Soacha	86
Tabla 37. Costos del Colector 5 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	89
Tabla 38. Parámetros hidráulicos del Colector 5 - Red Soacha	89
Tabla 39. Costos del Colector 6 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	92
Tabla 40. Parámetros hidráulicos del Colector 6 - Red Soacha	92
Tabla 41. Costos del Colector 7 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	95
Tabla 42. Parámetros hidráulicos del Colector 7 - Red Soacha	95
Tabla 43. Costos del Colector 8 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones	98
Tabla 44. Parámetros hidráulicos del Colector 8 - Red Soacha	99
Tabla 45. Costos de la red Soacha con las diferentes ecuaciones	101
Tabla 46. Costos de la red Guáimaro con las diferentes ecuaciones	103
Tabla 47. Parámetros hidráulicos de la red Guáimaro	103
Tabla 48. Costos del Sector norte - Red Concordia con las diferentes ecuaciones	107
Tabla 49. Parámetros hidráulicos del Sector norte - Red Concordia.....	108
Tabla 50. Costos del Sector sur - Red Concordia con las diferentes ecuaciones	112
Tabla 51. Parámetros hidráulicos del Sector sur - Red Concordia.....	112
Tabla 52. Costos de la red Caracolí con las diferentes ecuaciones	116
Tabla 53. Parámetros hidráulicos de la red Caracolí	116
Tabla 54. Costos de la red La Junta con las diferentes ecuaciones	121
Tabla 55. Parámetros hidráulicos de la red La Junta	121
Tabla 56. Total ahorro logrado con las diferentes ecuaciones de costo	127

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de Marchionni.....	8
Ecuación 2. Ecuación de Marchionni. (Coeficientes utilizados)	8
Ecuación 3. Ecuación de Maurer	9
Ecuación 4. Ecuación de Maurer (Coeficientes utilizados)	9
Ecuación 5. Ecuación de Moeini	10
Ecuación 6. Ecuación de Salcedo (Costos de tubería)	10
Ecuación 7. Ecuación de Salcedo (Costos de excavación)	11
Ecuación 8. Ecuación de Salcedo (Costos de relleno).....	11
Ecuación 9. Ecuación de Salcedo (costos de entibado)	12
Ecuación 10. Ecuación de Salcedo (costos de las cámaras de inspección).....	12
Ecuación 11. Ecuación de Peinado (costos de tubería)	13
Ecuación 12. Ecuación de Peinado (costos de excavación manual)	14
Ecuación 13. Ecuación de Peinado (costos de excavación con maquina)	14
Ecuación 14. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con arena).....	14
Ecuación 15. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con material seleccionado de cantera)	14
Ecuación 16. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con material propio de la excavación).....	14
Ecuación 17. Ecuación de Peinado (costos de las cámaras de inspección)	15

1 INTRODUCCIÓN

La ley 142 de 1994, donde se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones, define como servicio público de alcantarillado a la recolección municipal de residuos líquidos pluviales y residuales por medio de tuberías y conductos incluyendo las actividades de transporte, tratamiento y disposición final. Pero también cabe mencionar que existen alternativas para zonas rurales que por su ubicación no pueden ser parte de la red de tuberías. El servicio de drenaje urbano y todo el sistema de alcantarillado del país se encuentra sujeto a la capacidad de los gobiernos locales de suplir, mantener y actualizar la infraestructura de estos de acuerdo a las necesidades de la comunidad. Es por esto que no es raro que buena parte del territorio nacional no cuente con un mecanismo de evacuación de aguas residuales y pluviales que garanticen la calidad de vida de sus habitantes, y es claro que el tema de aumentar la cobertura y la calidad de todo lo competente a saneamiento básico debe ser de gran interés de los gobernantes del país en las diferentes jerarquías.

El Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado (2016) de la superintendencia de servicios públicos domiciliarios afirma que el planeamiento técnico, institucional y financiero de los sistemas de alcantarillado en el país, busca aumentar la cobertura, calidad y sostenibilidad de este servicio, debido a que el 65% de los municipios atendidos por los prestadores de la muestra de su estudio cuentan con coberturas superiores al 90% y algunos con menos del 50%, estos datos se firman con la salvedad de que el estudio se hizo alrededor de cabeceras municipales y solo señala el acceso al servicio público domiciliario de alcantarillado que proveen las empresas de servicios públicos y no es un indicador de acceso al saneamiento básico.

El CONPES aprobó, como consta en el documento DNP-2.532-UDU, el Plan del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico PAS para elevar las coberturas de acueductos y alcantarillados del país del 66% al 76% y del 51% al 57% respectivamente, reestructurar las instituciones sectoriales y aumentar la potabilidad del agua.

Dentro de los gastos o inversiones elegibles con recursos de la nación, destinados a las diferentes entidades territoriales, se encuentran establecidas actividades relacionadas con la formulación e implantación de esquemas organizacionales para la administración y operación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y además la construcción, ampliación y rehabilitación de los mismos. De manera que todos los proyectos del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico que pretendan acceder a recursos de la Nación, deben ser radicados y viabilizados a través del mecanismo de la Ventanilla Única.

Dicho el interés del gobierno y la necesidad de la población, el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico se encarga de promover el desarrollo sostenible a través de la formulación y adopción de las políticas, programas, proyectos, y dada la limitación de recursos el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio reglamentó procesos de presentación, viabilización y aprobación de proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico que soliciten apoyo financiero de la nación a través de la Resolución 1063 del 30 de diciembre del 2016. Por lo anterior esta investigación pretende determinar si los recursos suministrados por el estado están siendo utilizados de la manera óptima de modo que ejecuten proyectos de redes de drenaje urbano RDU tal que se puedan construir y operar, con un nivel suficiente de confianza de manera que se pueda asegurar que los recursos nación se invierten con la suficiente estrategia como para garantizar la excelencia del servicio y el ahorro máximo de recursos. Esto será el resultado de la modelación de los diseños recolectados y su respectiva optimización por medio de la herramienta computacional UTOPIA, desarrollada por el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados CIACUA de la Universidad de Los Andes.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Comparar los costos de los diseños de RDUs presentados en el mecanismo de viabilización de proyectos del ministerio de vivienda, ciudad y territorio con los diseños optimizados de las mismas redes y de esta manera poder evaluar el valor de la optimización en este tipo de proyectos.

1.1.2 Específicos

- Crear una base de datos con proyectos que contengan en sus documentos los elementos hidráulicos y topológicos necesarios para su respectiva optimización.
- Crear el archivo de entrada de datos de la red requerido por el software UTOPIA para realizar la optimización.
- Realizar el diseño optimizado de las redes mediante el software UTOPIA basadas en la minimización de costos y cumplimiento de restricciones hidráulicas.
- Identificar diferencias entre costos y parámetros hidráulicos de los diseños presentados en el Mecanismo de Viabilización de Proyectos del MVCT y los diseños optimizados de esas mismas redes.

2 MARCO TEÓRICO

Las redes de evacuación de aguas residuales pluviales y sanitarias son necesarias dentro del desarrollo de zonas urbanas debido a la constante interacción entre el hombre y el ciclo natural del agua. Esto se presenta por la necesidad del hombre de abastecerse de agua para su consumo y por el proceso de urbanización que desvía los sistemas de drenaje naturales originales, como producto de lo anterior se producen aguas residuales y pluviales que deben ser canalizadas para posteriormente recibir el tratamiento adecuado según su origen. El propósito de las redes de drenaje urbano es minimizar posibles problemas causados a seres humanos o al ambiente (Butler & Davies, 2011). El desarrollo de las comunidades trae consigo densificación y nuevas tecnologías, herramientas y demás componentes novedosos al sistema productivo que incentivan el consumo de recursos naturales y por consiguiente mayor generación de residuos, tanto así que el ingenio de alternativas de disposición final es actualmente un área de investigación y trabajo constante.

El mundo actual, cada vez más competitivo desde todas las perspectivas sociales, establece criterios de desarrollo en los cuales se traduce el avance de una comunidad respecto a otra. La información sobre el estado y las tecnologías utilizadas en los sistemas de saneamiento básico de una población representan claramente un indicador muy aproximado a la calidad de vida de sus habitantes por lo cual este tema es de vital importancia para los gobernantes en las diferentes jerarquías y es ahí donde queda clara la importancia del correcto aprovechamiento de los recursos al momento de invertir en sistemas de evacuación de aguas residuales.

2.1 Sistemas de alcantarillado en Colombia

Según el departamento nacional de planeación DNP, Colombia en el año 2013 alcanzaba una cobertura en el servicio de alcantarillado de 91,18% en el área urbana y 69,93% para lo rural, incluyendo soluciones alternativas (Ilustración 1). Para el 2018 según las bases para el plan de desarrollo 2018-2022 es necesario proveer cobertura universal y garantizar el adecuado tratamiento de las aguas residuales. Para cumplir con este propósito, son necesarias inversiones del orden de \$14,2 billones (DNP, Bases para El Plan Nacional de Desarrollo 2018- 2022 "Pacto por Colombia, pacto por la equidad", 2018).

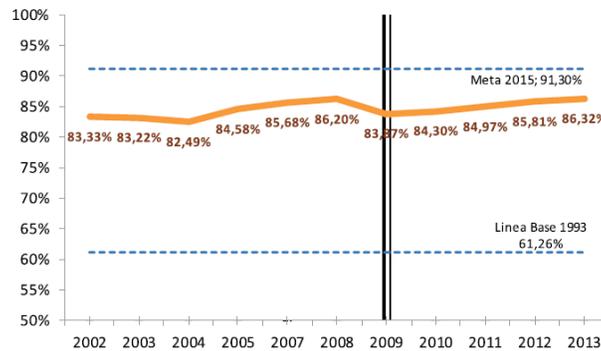


Ilustración 1. Cobertura nacional de alcantarillado (2002 - 2013). Con soluciones alternativas (DNP, 2013)

La Ley 142 de 1994, estableció que la prestación de los servicios debe llevarse a cabo a través de empresas de servicios públicos (E.S.P.) constituidas por acciones y por organizaciones autorizadas en zonas rurales o áreas urbanas específicas y el ritmo de construcción de sistemas de alcantarillados en Colombia claramente está determinado por la capacidad de financiación que tengan este tipo de proyectos los cuales pueden ser otorgados por la nación a través de figuras como lo son los planes departamentales de agua PDAs considerados como la estrategia del Estado para acelerar el crecimiento de las coberturas y mejorar la calidad de los servicios (DNP, 2007). Estos planes son el resultado de recomendaciones hechas por el banco mundial las recomendaciones del Banco Mundial. En dichas sugerencias *“se planteó la necesidad de definir políticas para promover la consolidación o agrupación de las empresas de menor tamaño por medio de empresas regionales u operadores de mayor escala que ya tengan en su poder las economías de escala propias del sector y puedan trasladar ese beneficio a los municipios”* (Suárez & Cardona, 2009).

De esta manera la idea es que cada departamento formule su Plan Departamental de Agua y Saneamiento Básico de acuerdo con los lineamientos dados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, el cual se presentará ante alcaldes, concejales y diputados. Las Entidades territoriales formularán los proyectos de acuerdo con lo dispuesto en la Guía de acceso, presentación y viabilización de proyectos del sector de agua potable y saneamiento a financiar mediante el mecanismo de ventanilla única y los presentarán a la gerencia del Plan Departamental de Agua y Saneamiento para su evaluación o quien haga sus veces. Si el proyecto cumple con lo exigido en la guía, la gerencia lo remitirá a la Ventanilla Única del MAVDT para su evaluación y viabilización.

2.1.1 Ventanilla Única

En Colombia se le denomina *ventanilla unica* al mecanismo de viabilización de proyectos que es el proceso mediante el cual el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, evalúa, aprueba y viabiliza los proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico presentados por las entidades territoriales que soliciten apoyo financiero de

la Nación, así como las reformulaciones que estos requieran, de esta manera está definido en la resolución 1063 de 2016 "Por la cual se establecen los requisitos de presentación, viabilización y aprobación de proyectos del sector de agua potable y saneamiento básico que soliciten apoyo financiero de la Nación, así como de aquellos que han sido priorizados en el marco de los Planes Departamentales de Agua y de los programas que implemente el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, a través del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, y se dictan otras disposiciones" (MVCT, 2016).

Luego de iniciar el trámite de viabilización, según el cumplimiento de los requisitos solicitados y establecidos en la resolución 1063 de 2016, esta misma en el artículo 15 determina que el estado del proyecto puede ser:

Sin radicación: Es aquel que al momento de su presentación no cumple con los requisitos señalados en la lista de verificación de documentos establecida en la Guía de Presentación de Proyectos y será devuelto sin radicación ante el mecanismo de viabilización del Ministerio.

En evaluación: El proyecto que al momento de su presentación cumpla con los requisitos señalados en la lista de verificación de documentos establecida en la Guía de Presentación de Proyectos, pasará a reparto para su correspondiente evaluación.

En requerimiento: Se asignará este estado al proyecto que una vez evaluado requiera ajustes en su formulación.

Devuelto: este estado indica que el proyecto requiere ajustes mayores en su formulación o aquellos en los cuales el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio efectuó dos (2) requerimientos y/o luego de seis (6) meses de enviado el último de ellos, la entidad territorial no presentó los ajustes exigidos. En ningún caso la devolución de proyectos significará el rechazo de los mismos.

2.2 Optimización en diseños de redes de alcantarillado

Dada la importancia de las redes de alcantarillado para una de terminada comunidad, introducir el concepto de optimización en el diseño de este tipo de redes se concibe como tema de estudio por lo que los costos de construcción implican una inversión significativa para las ciudades, y economizar sin afectar eficiencia siempre será una meta que alcanzar. Algunos ejemplos de estos trabajos son: Continuous Ant Colony Optimization Algorithm (CACOA) (Afshar, A parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: constrained and unconstrained approach, 2010), Cellular Automata (CA) (Afshar, Shahidi, Rohani, & Sargolzaei, 2011), Tabu Search (TS) y Simulated Annealing (SA) (Yeh, Chu, Chan, & Lin, 2013), entre otros. Los procesos de optimización en el diseño de sistemas de alcantarillado tienen como resultado diseños

que cumplen con todos los aspectos hidráulicos y cuyo costo de construcción es mínimo posible. Al igual que otros problemas de optimización, en este problema existen cuatro componentes importantes para el modelaje y solución: los parámetros, las variables de decisión, las restricciones y la función objetivo. Los parámetros proporcionan la información necesaria, o conocida, que se tiene de los problemas. Las variables de decisiones son los aspectos del problema sobre los cuales el decisor tiene injerencia. Las restricciones limitan el problema estableciendo las reglas que se deben cumplir en una solución de mismo. Finalmente, la función objetivo guía la búsqueda de la solución que se quiere encontrar (Duque, METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE TUBERÍAS EN SERIE EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO, 2013).

El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA de la Universidad de los Andes, ha trabajado durante varios años en el desarrollo de una herramienta computacional que permite encontrar el diseño óptimo de una red de alcantarillado de una manera rápida. UTOPIA, Underground Topology for Optimal Pipe Infrastructure Assessment (Topología subterránea para la evaluación óptima de la infraestructura de tuberías.) está basado en la metodología planteada por (Duque, Duque , & Saldarriaga , 2016), donde el diseño de la red se divide en dos fases, selección del trazado y diseño hidráulico (Ilustración 2).

La primera de estas fases se concibe como un modelo de programación entera mixta que se conoce en la literatura como problema de diseño de redes (NDP en inglés). Los datos de entrada son la topografía de la red, que se refiere a la ubicación de los pozos de inspección y los caudales de entrada de aguas residuales correspondientes a cada uno. Así, es posible definir la dirección del flujo, el tipo y el caudal de diseño de cada una de las tuberías de la red. De esta manera se transporta el caudal que ingresa a la red por los pozos de inspección a través del conjunto de tuberías hacia un único punto de descarga. Finalmente, resulta importante destacar que la solución de este modelo de programación entera mixta se resuelve mediante una implementación en el software de optimización lineal XPRESS-MP. Donde el objetivo es minimizar los costos asociados al caudal y el tipo de las tuberías (Aguilar, 2016). La segunda fase, el diseño hidráulico, resulta de la aplicación del algoritmo de ruta más corta: Bellman- Ford. Este problema busca encontrar el camino de mínimo costo (distancia o tiempo de recorrido) desde un nodo específico inicial hasta un nodo final (Duque, 2013), lo cual resulta de la combinación de diámetro y pendiente posible para cada tramo de la red. En esta metodología parte del mejor resultado de la selección del trazado de la red, donde se empieza por determinar todos los nodos posibles que puede haber en cada cámara de inspección. La cantidad combinaciones diámetro-pendiente posibles en cada pozo de inspección está definida principalmente por las profundidades de excavación máximas y mínimas permitidas, pero también depende de las demás restricciones hidráulicas que el diseñador considere pertinentes (velocidades, pendientes, esfuerzo cortante, régimen de flujo etc.)

UTOPIA determina el diámetro d de una lista de diámetros disponible y la pendiente s que debe tener cada tubería para poder transportar el caudal requerido. Para ello, el programa requiere los

resultados de la primera sección: el tipo de tubería, dirección de cada tramo, caudal de cada tramo de la red. Y adicionalmente, la lista de diámetros comerciales y el material de la tubería. Teniendo todas las soluciones posibles, el programa selecciona la opción de menor costo de cada tramo, siempre y cuando esta cumpla con las restricciones hidráulicas establecidas por el diseñador y posteriormente suma los costos de todos los tramos. Finalmente, se obtiene como resultado el trazado y topografía de la red, los caudales que son transportados por cada una de las tuberías y el costo total de construcción de esta misma, el cual es el resultado de ecuaciones obtenidas de la literatura.

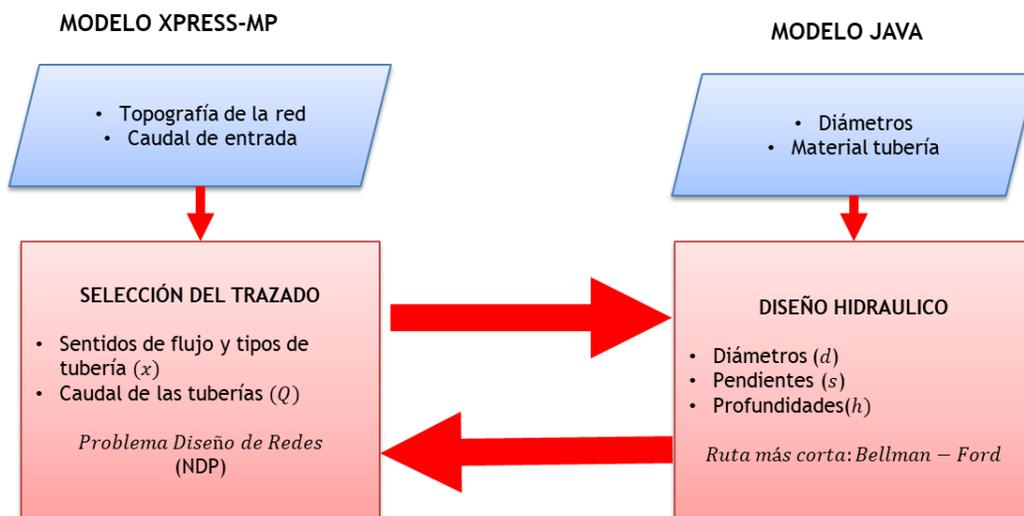


Ilustración 2. Metodología de optimización UTOPIA. (Aguilar, 2016)

2.3 Ecuaciones de costo

Alrededor del interés de estimar mediante una ecuación el costo de construcción de una red, se han desarrollado diferentes investigaciones que han tenido como resultado la estimación de este valor en función del diámetro d de las tuberías y las profundidades de excavación h de cada una de ellas. La mayoría de ecuaciones solo tienen en cuenta los costos de instalación de las tuberías, que dependen netamente del material y la longitud del tramo, y los costos de excavación de cada sección. Esto debido a que representan en promedio el 70% de los costos totales de construcción de una red (Aguilar, 2016).

2.3.1 Ecuación de Marchionni

En el artículo “*Sewer Systems Costs with Multiple Linear Regression*” por (Marchionni, Lopes, Mamouros, & Covas, 2014) se puede encontrar una ecuación en la que el valor de las variables dependientes, CT_{Pipe} y CT_{MH} , viene dado por una suma de un conjunto de variables independientes

relacionadas con varios ítems de costo y coeficientes de regresión (α_n, β_n) que estimados por el método de mínimos cuadrados. La ecuación para tuberías fluyendo por gravedad es:

$$CT_{Pipes} = \alpha_0 + \alpha_1 D + \alpha_2 H + \alpha_3 DH$$

$$CT_{MH} = \beta_0 + \beta_1 H'$$

$$C = CT_{Pipes} + CT_{MH}$$

Ecuación 1. Ecuación de Marchionni

Donde:

- α_n, β_n : Coeficientes de regresión
 D : Diámetro de la tubería
 H : de la profundidad de excavación
 H' : profundidad de los pozos

Esta ecuación define los costos como una función de las principales características físicas, tales como, el material y el diámetro de la tubería, la profundidad de excavación. Luego de los cálculos y pruebas con diferentes datos recolectados por los investigadores. La ecuación de tuberías fluyendo por gravedad con los respectivos coeficiente corresponde a:

$$CT_{Pipes} = -203.3111 + 0.1254D + 131.439H - 0.044DH$$

$$CT_{MH} = 1.6928 + 3.623H'$$

$$C = CT_{Pipes} + CT_{MH}$$

Ecuación 2. Ecuación de Marchionni. (Coeficientes utilizados)

2.3.2 Ecuación de Maurer

En el artículo “*Factors affecting economies of scale in combined sewer systems*” por (Maurer, Wolfram, & Anja, 2010), se presenta una ecuación que permite calcular el costo de instalación de un tramo de tubería en función del diámetro de la misma y la profundidad de excavación en la que se encuentra. Además, se involucran las condiciones del terreno donde se esté realizando la construcción (áreas verdes o bajo calles existentes). En el artículo se establecen los valores que deben tomar las variables de la ecuación según sean las condiciones del caso donde se desee aplicar. Dichas condiciones, en el desarrollo esta ecuación, van incluidas en el cálculo de los coeficientes α y β que posteriormente se utilizan para la estimación del costo total de construcción del tramo, con resultados en USD.

$$\alpha = m_{\alpha} \cdot DN + n_{\alpha}$$

$$\beta = f_{SF1} \cdot m_{\beta} \cdot DN + f_{SF2} \cdot n_{\alpha}$$

$$C = \alpha \cdot D + \beta$$

Ecuación 3. Ecuación de Maurer

Donde:

- α : Coeficiente de costos relacionados con la profundidad en función de diámetro de la tubería (US\$ m⁻²)
- β : Costo fijo en función del diámetro de la tubería y recubrimiento (US\$ m⁻¹)
- m_{α}, m_{β} : Coeficientes relacionado con el diámetro (US\$ m⁻² mm⁻¹)
- n_{α}, n_{β} : Coeficientes de costos independientes del diámetro (US\$ m⁻² y US\$ m⁻¹ respectivamente)
- f_{SF1}, f_{SF2} : Factores de reducción considerando los costos reducidos para la construcción de campo verde en comparación con construcción bajo la calle.
- DN : Diámetro interno de la tubería (mm)
- D : Profundidad media de la tubería (m)
- C : Costo de construcción específico (US\$ m⁻¹)

Las redes que se analizaran en este trabajo se encuentran bajo las mismas condiciones en cuanto a los coeficientes utilizados por esta ecuación. Por lo cual muestra la ecuación de Maurer con el valor de los coeficientes a utilizar en todos los escenarios de optimización.

$$\alpha = 110 * DN + 127$$

$$\beta = 1200 * DN - 35$$

$$C = \alpha \cdot D + \beta$$

Ecuación 4. Ecuación de Maurer (Coeficientes utilizados)

2.3.3 Ecuación de Moeini

En el artículo “*Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants*” por (Moeini & Afshar, 2012), se muestra el resultado de una investigación donde se indican la capacidad del método propuesto para optimizar y resolver el problema de diseño y determinación de tamaño de redes de alcantarillado. La Ecuación 5 es la relación explícita que se utiliza para el cálculo del costo de la instalación de tuberías y los pozos de inspección. El valor de construcción de la tubería es la suma de la instalación de tuberías más pozos de inspección, con resultado en IRR.

$$C_t = 10.93e^{3.43d} + 0.012 \cdot h_p^{1.53} + 0.437 \cdot h_p^{1.47} \cdot d$$

$$C_N = 41.46 \cdot h_f$$

$$C = C_t + C_N$$

Ecuación 5. Ecuación de Moeni

Donde:

- C_t : Costo de instalación de tubería (IRR m⁻¹)
- C_N : Costo de instalación de pozos de inspección (IRR m⁻¹)
- C : Costo específico total de la construcción (IRR m⁻¹)
- d : Diámetro interno de la tubería (m)
- h_p : Profundidad promedio de la tubería (m)
- h_f : Profundidad del pozo final del tramo (m)

2.3.4 Ecuación de Salcedo

Esta ecuación representa los costos involucrados en el diseño de los sistemas de alcantarillado considerados como criterio fundamental en el momento de seleccionar la mejor alternativa dentro de un grupo de posibilidades donde todas son funcionales hidráulicamente hablando, es decir, son utilizados como un criterio de optimización. Estos costos son los asociados a tubería, excavación, relleno, entibado y cámaras de inspección, y se presenta brevemente la información utilizada por (Salcedo, 2012) para su respectiva determinación.

- Costos de tubería

Este ítem hace referencia a los costos involucrados en el suministro e instalación de los conductos, sin tener en cuenta el componente asociado con la excavación según el Instituto de Desarrollo Urbano en el 2012. Para la obtención de esta función de costo, se utilizó el catálogo de precios de PAVCO para tuberías NOVALOC y NOVAFORT publicada en Febrero de 2012 y vigente hasta la fecha. De este catálogo se tomó el precio en pesos colombianos (\$COP) sin I.V.A (Impuesto al Valor Agregado) para un metro lineal de tubería de diferentes diámetros comerciales.

$$C_{Tubería} = L * 622749d^{1.9799}$$

Ecuación 6. Ecuación de Salcedo (Costos de tubería)

Donde:

- $C_{tubería}$: Costo total asociado a la tubería de un tramo de la red (\$COP)
- L : Longitud del tramo analizado (m)
- d : Diámetro interno de la tubería (m)

- Costos de excavación

Para el planteamiento de las funciones de costo asociada a los costos de excavación, se utilizaron las cifras obtenidas del Listado de Precios de Referencia de Actividades de Obra del Instituto de Desarrollo Urbano en su versión del 2012.

$$C_{Exc} = 20119.53 * a + 25938.52 * b * (V_{Exc} + H_{prom} * L * \cos(\theta))$$

Ecuación 7. Ecuación de Salcedo (Costos de excavación)

Donde:

C_{Exc} : Costo total asociado a la excavación de un tramo de la red (\$COP)

L : Longitud del tramo analizado (m)

H_{prom} : Profundidad de excavación promedio del tramo (m)

a : 1 si $H_{prom} < 2 m$
0 d.l.c

b : 1 si $H_{prom} > 2 m$
0 d.l.c

V_{exc} : Volumen de tierra asociado a la instalación de la tubería (m³)

θ : Ángulo formado por la tubería con la horizontal

- Costos de relleno

Esta ecuación utilizó la Lista de Precios de Referencia del Instituto de Desarrollo Urbano del año 2012 para plantear una expresión que describa los costos de llevar a cabo el proceso de relleno empleado el mismo que fue extraído en la excavación.

$$C_{Rell} = 18125.89 * \left[V_{Exc} + H_{prom} * L * \cos(\theta) - \frac{\pi d^2}{4} * L * \cos(\theta) \right]$$

Ecuación 8. Ecuación de Salcedo (Costos de relleno)

Donde:

C_{Rell} : Costo total asociado al relleno de un tramo de la red (\$COP)

d : Diámetro interno de la tubería (m)

L : Longitud del tramo analizado (m)

H_{prom} : Profundidad de excavación promedio del tramo (m)

V_{exc} : Volumen de tierra asociado a la instalación de la tubería (m^3)
 θ : Ángulo formado por la tubería con la horizontal

- Costos de entibado

El planteamiento de la función de costo asociada con esta actividad se hizo utilizando el Listado de Precios de Actividades en Obra del IDU válido desde Agosto del 2012. Originalmente esta ecuación plantea que se debe utilizar entibado cuando la profundidad de excavación supere 1.2 m pero para efectos de este trabajo se aumentó este límite hasta 2 m, lo anterior mediante la constante Z de la ecuación.

$$C_{Ent} = 23033.89 * L * \text{Cos}(\theta) * Z * 2 * c$$

Ecuación 9. Ecuación de Salcedo (costos de entibado)

Donde:

C_{Ent} : Costo total asociado al entibado de un tramo de la red (\$COP)

L : Longitud del tramo analizado (m)

Z : *Cota Terreno final – Cota Batea final + 0.15*

c : 1 si $Z > 2 m$
0 *d.l.c*

θ : Ángulo formado por la tubería con la horizontal

- Costos de cámaras de inspección

Para lograr plantear una ecuación que describiera los costos asociados con las cámaras de inspección se recopiló información de diferentes fuentes tales como Instituto de Desarrollo Urbano, la Gobernación del Valle del Cauca y Construdata.

$$C_{cámaras} = 1.043 * (194014 * H^2 - 194118 * H + 856764)$$

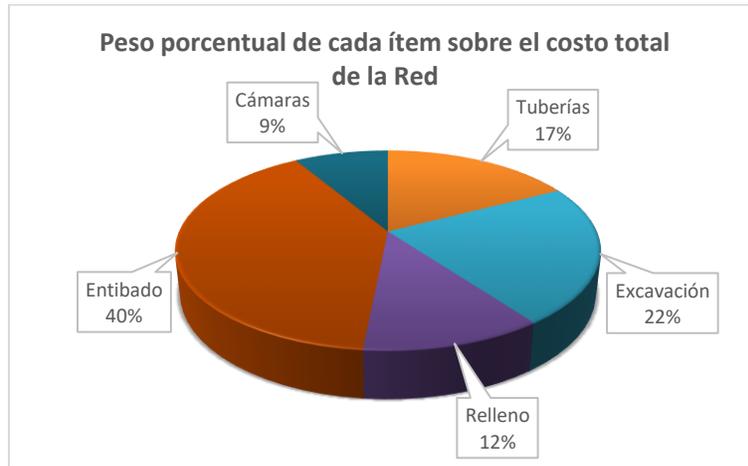
Ecuación 10. Ecuación de Salcedo (costos de las cámaras de inspección)

Donde:

$C_{cámara}$: Costo de la Cámara de Inspección (\$COP)

H : Profundidad de excavación (m)

Al final, haciendo una repartición de manera porcentual, se puede afirmar que esta ecuación distribuye los diferentes costos involucrados en el costo total de la red de la siguiente manera:



Gráfica 1. Peso porcentual de cada ítem sobre el costo total de la red. Ecuación Salcedo

Con la suma de las anteriores ecuaciones se logra obtener el costo total de diseño para un tramo de alcantarillado en pesos colombianos (\$COP)

2.3.5 Ecuación de Peinado

Peinado en su trabajo logra establecer funciones de costo por unidad de longitud de tramo construido acorde con los diseños obtenidos de las redes patrón seleccionadas. aclara que para establecer las funciones de costo que a continuación se presentan solo se correlacionó la suma del costo de Suministro e instalación de tuberías, excavaciones, rellenos y retiro de material sobrante con el diámetro nominal D y la profundidad promedio de instalación Hm (Peinado, 2016). En el documento original se tienen en cuenta 7 costos para calcular el valor total del costo de un tramo construido, pero en el desarrollo de este trabajo se seleccionaron 4 de ellos, los cuales son; costos por tubería, excavación, relleno y cámaras de inspección.

- Costos de tubería

$$C_{tubería} = 6.9474d^{1.6438}$$

Ecuación 11. Ecuación de Peinado (costos de tubería)

Donde:

- $C_{tubería}$: Costo de suministro e instalación de tubería en cada tramo (\$COP)
 d : Diámetro nominal de la tubería (mm)

- Costo de excavación

Para el cálculo del costo de excavación, la metodología de peinado establece que pueden existir excavaciones de tipo manual o con máquina, y dependiendo de esto se evaluarán los costos. Esto va a estar condicionado a la profundidad de excavación promedio requerida, de tal manera que si esta es menor o igual a 2 m será una excavación tipo manual y de lo contrario será necesario implementar maquinaria.

$$C_{ex.manual} = 17205 * H_{prom} * (d + 2 * E + 0.4) * L$$

Ecuación 12. Ecuación de Peinado (costos de excavación manual)

$$C_{ex.maquina} = 15468 * H_{prom} * (d + 2 * E + 0.4) * L$$

Ecuación 13. Ecuación de Peinado (costos de excavación con maquina)

Donde:

$C_{ex.manual}$:	Costo de excavación manual en cada tramo (\$COP)
$C_{ex.maquina}$:	Costo de excavación con maquina en cada tramo (\$COP)
H_{prom} :	Profundidad promedio de instalación (m)
d :	Diámetro interno de la tubería (m)
E :	Espesor de la tubería (m)
L :	Longitud del tramo (m)

- Costos de relleno

Los costos de relleno involucran tres materiales (arena, material seleccionado de cantera y material propio de la excavación) y cada uno de estos tiene su respectivo costo. Al final el costo asociado al relleno será la suma de estos tres.

$$C_{R.arena} = \left[0.1 * (d + 2 * E + 0.4) * \frac{L}{\cos(\tan^{-1}(s))} \right] * 59075$$

Ecuación 14. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con arena)

$$C_{R.m.c} = \left[(d + 2 * E + 0.4) * (d + 2 * E) - \frac{\pi}{4} * (d + 2 * E)^2 \right] * \frac{L}{\cos(\tan^{-1}(s))} * 42154$$

Ecuación 15. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con material seleccionado de cantera)

$$C_{R.m.exc} = [H_{prom} - (0.1 + (d * 2 * E))] * (d + 2 * E + 0.4) * L * 17310$$

Ecuación 16. Ecuación de Peinado (Costo de relleno con material propio de la excavación)

Donde:

- $C_{R.arena}$: Costo de relleno con arena (\$COP)
- $C_{R.m.c}$: Costo de relleno con material seleccionado de cantera (\$COP)
- $C_{R.m.exc}$: Costo de relleno con material propio de la excavación (\$COP)
- H_{prom} : Profundidad promedio de instalación (m)
- d : Diámetro interno de la tubería (m)
- E : Espesor de la tubería (m)
- L : Longitud del tramo (m)
- s : Pendiente de la tubería (m/m)

- Costos de cámaras de inspección

Los costos de las cámaras de inspección fueron el resultado de la comparación de diferentes tipos de cámaras del mercado. Finalmente la siguiente expresión consolida el trabajo realizado por (Peinado, 2016) sobre este ítem.

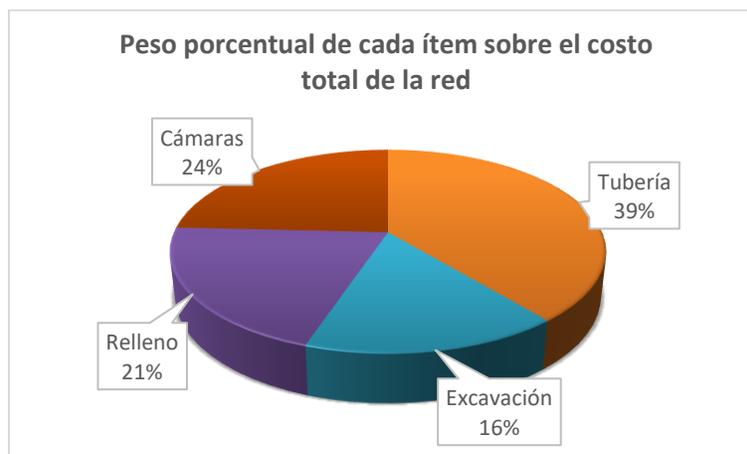
$$C_{cámaras} = 183643 * h_{final}^2 - 354440 * h_{final} + 2253124$$

Ecuación 17. Ecuación de Peinado (costos de las cámaras de inspección)

Donde:

- $C_{cámaras}$: Costo de la Cámara de Inspección (\$COP)
- H_{final} : Profundidad de excavación (m)

Al final, haciendo una repartición de manera porcentual, se puede afirmar que esta ecuación distribuye los diferentes costos involucrados en el costo total de la red de la siguiente manera:



Gráfica 2. Peso porcentual de cada ítem sobre el costo total de la red. Ecuación Peinado

Con la suma de las anteriores ecuaciones se logra obtener el costo total de diseño para un tramo de alcantarillado en pesos colombianos (\$COP)

2.4 Restricciones hidráulicas

En Colombia los temas relacionados con abastecimiento de agua y saneamiento básico están pautados por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Específicamente en el título D se encuentra todo lo relacionado con los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales.

Las redes escogidas para este trabajo, a pesar de basarse en la misma normativa, fueron desarrolladas bajo diferentes versiones de la misma. RAS 2000, 2016 y la resolución 0330 de 2017 en la cual se realizaron las últimas modificaciones. El título D ofrece las disposiciones en prácticas de buena ingeniería en todas las etapas de proyectos que involucren este tipo de redes, desde la conceptualización, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y seguimiento, con el fin de garantizar la efectividad, seguridad, estabilidad, durabilidad, operación adecuada, sostenibilidad y redundancia a lo largo de la vida útil del sistema de alcantarillado (MVCT, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2016). Los parámetros de diseño que establece este reglamento y que serán concebidos como restricciones hidráulicas en este trabajo son los siguientes:

- *Velocidad mínima y máxima:* Se establecen respectivamente, con el fin de evitar la acumulación de sedimentos en las tuberías y problemas de cavitación, daños estructurales y demás problemas hidráulicos.
- *Esfuerzo cortante:* Con el fin de garantizar el criterio de auto-limpieza, se establece un valor mínimo de esfuerzo cortante de tal manera que los sedimentos que ingresen al sistema puedan moverse por acción del flujo hacia aguas abajo de las tuberías.
- *Diámetros mínimos:* dependiendo del tipo de agua que transite la tubería, la normativa establece un diámetro interno mínimo con el objetivo de evitar obstrucciones que posteriormente puedan conllevar al colapso de las tuberías.
- *Recubrimiento mínimo de excavación:* Este criterio se utiliza con el fin de proteger la estructura. Debido al tipo de tránsito que exista sobre el terreno en el cual se encuentra instalada la tubería, el terreno puede sufrir subsidencias que posiblemente podrían provocar rupturas, la severidad de estas dependerán del material del que sea la tubería. Es medido desde la cota terreno hasta la cota clave de la tubería.

- *Profundidad máxima de excavación:* Esta restricción va ligada a la seguridad de la construcción y de los trabajadores de la misma.
- *Relación de llenado máxima:* En el diseño se debe respetar y establecer una profundidad de llenado máxima en cada una de las tuberías con el fin de permitir una adecuada aireación para el flujo dentro de cada tramo (MVCT, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2016). Este valor también se ajusta a la relación de llenado máxima que permite el mejor funcionamiento hidráulico óptimo dentro de una sección circular

Tabla 1. Parámetros de diseño como restricciones hidráulicas

PARÁMETRO	RAS 2000		RAS 2016		0330 DE 2017	
	Sanitario	Pluvial	pluvial	sanitario	sanitario	Combinado y pluvial
Diámetro mínimo	200 mm	250 mm	215 mm	170 mm	170 mm	260 mm
	150 mm (N.C bajo)	200 mm (N.C bajo y medio)	170 mm (N.C bajo y medio)	145 mm (medio y bajo)	140 mm (menores 2.500 ha)	
Velocidad mínima	0.45 m/s	0.75 m/s	0.75 m/s	0.45 m/s	Tao min	Tao min
Velocidad máxima	5 m/s	10 m/s	10 m/s	5 m/s	5 m/s	5 m/s
Relación de llenado máxima	70-85 %	100%	100%	85%	85%	93%
Esfuerzo cortante mínimo	1 Pa	3 Pa	2.5 Pa < 450 mm 3 Pa > 450 mm	1 Pa	1 Pa	2 Pa
Rango de profundidad de excavación	1.2 a 5 m					

3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este proyecto, dada la naturaleza y los objetivos del mismo, hace necesario la recopilación de datos promedio de un trabajo de campo, para de esta manera crear una base de datos con los documentos que contengan información hidráulica y topológica de diseños de RDUs presentados ante el mecanismo de viabilización de proyectos del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - MVCT. Dichos proyectos serán aptos para ser utilizados en este trabajo dependiendo de si contienen o no la información necesaria para crear los archivos de entrada *.inp*, que son leídos por UTOPIA para realizar el respectivo diseño optimizado. Posteriormente es necesario definir las ecuaciones de costos que se utilizaran para evaluar los costos de los diseños viabilizados y los optimizados de esas mismas redes. Teniendo los costos originales del proyecto y los costos optimizados es posible realizar un análisis comparativo de las variaciones que se presenten en ellos, además, como se traduce la optimización en los parámetros hidráulicos de la red.

3.1 Base de datos

Para obtener acceso a los proyectos radicados ante el mecanismo de ventanilla única del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – MVCT, fue necesario solicitar un permiso mediante la radicación de un oficio dirigido Martha Lucía Duran Ortiz, directora de Proyectos MVCT. Una vez concedida la autorización, se pudo consultar la información directamente en las oficinas del ministerio y obtener aquellas disponibles en formato digital con la información necesaria, es decir, aquella información topológica e hidráulica necesaria para construir el archivo que se le suministra a UTOPIA. Esta información es pertinentes de tuberías y nodos como consta en la siguiente tabla

Tabla 2. Información necesaria de las redes para crear archivo *.inp*

Sección	Información
Pozos	Cantidad e identificación de pozos
	Coordenadas
	Cota fondo y rasante
Tuberías	Material
	Pendiente
	Longitud
	Diámetro
	Caudal de diseño
	Cotas clave y batea
Identificación de tramos iniciales y continuos	

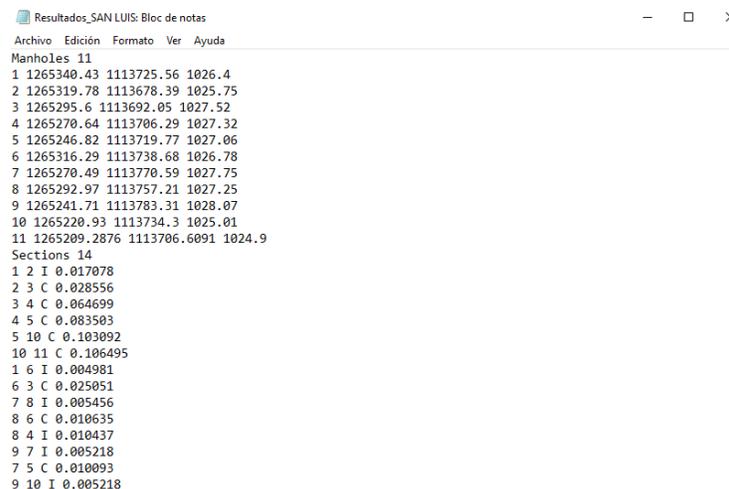
3.2 Selección de Ecuaciones de diseño

Luego de la revisión bibliográfica que permitió conocer las ecuaciones mencionadas en el apartado 2.3 y revisando los criterios de aplicabilidad de las mismas, además, de las condiciones de las redes seleccionadas, no se utilizó la ecuación 2.3.1 debido a que el rango de diámetros que manejan las redes de la base de datos no la hace aplicable.

Seleccionadas las ecuaciones fue posible evaluar el costo de cada una de las redes pertenecientes a la base de datos, con las condiciones originales del proyecto. Este es el resultado base sobre el cual se evaluara la variación que tenga el costo del diseño optimizado.

3.3 Archivos de entrada para UTOPIA

La creación de los archivos de entrada *.inp* son el paso inicial al diseño optimizado por medio de UTOPIA. Como es claro en la Ilustración 2 el problema es dividido en dos partes: Selección del trazado y diseño hidráulico. Para cumplir el objetivo inicial de esta investigación, la primera parte será condicionada de tal manera que cumpla con lo establecido en el diseño inicial, es decir, que se conserve la topología de la red en cuestiones de trazado, tuberías iniciales y continuas, caudales de diseño y sentido del flujo. Para esto es necesario crear un archivo de texto *.txt* con la información de las tuberías y pozos (manholes) como se puede ver en la Ilustración 3. En la primera fila se definen la cantidad de manholes de la red, y en las siguientes la información de cada uno de los pozos, la id con números enteros y las coordenadas X, Y y Z.



```
Resultados_SAN LUIS: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Manholes 11
1 1265340.43 1113725.56 1026.4
2 1265319.78 1113678.39 1025.75
3 1265295.6 1113692.05 1027.52
4 1265270.64 1113706.29 1027.32
5 1265246.82 1113719.77 1027.06
6 1265316.29 1113738.68 1026.78
7 1265270.49 1113770.59 1027.75
8 1265292.97 1113757.21 1027.25
9 1265241.71 1113783.31 1028.07
10 1265220.93 1113734.3 1025.01
11 1265209.2876 1113706.6091 1024.9
Sections 14
1 2 I 0.017078
2 3 C 0.028556
3 4 C 0.064699
4 5 C 0.083503
5 10 C 0.103092
10 11 C 0.106495
1 6 I 0.004981
6 3 C 0.025051
7 8 I 0.005456
8 6 C 0.010635
8 4 I 0.010437
9 7 I 0.005218
7 5 C 0.010093
9 10 I 0.005218
```

Ilustración 3. Ejemplo de archivo de entrada a UTOPIA

Seguidamente se digita la información de las tuberías (sections) indicando la conectividad mediante los pozos. Luego es necesario definir el manhole de inicio y fin de cada una de las tuberías

acompañado de la letra I o C, dependiendo si la tubería es un arranque o continua, además del caudal de diseño de cada uno de los tramos.

Para que se realice la optimización de la red, es necesario suministrar una lista de diámetros disponibles, esto será determinante del tiempo computacional necesario para realizar la optimización. Cabe aclarar que estos diámetros serán todos los utilizados en cada uno de los proyectos. Además de lo anterior, la ecuación hidráulica de diseño (Darcy-Weisbach o Manning) se mantendrá como la original en cada red al momento de la optimización con los valores de los coeficientes correspondientes.

4 RESULTADOS

Una vez revisados y seleccionados, los proyectos de RDUs utilizados para esta investigación en la Tabla 3 se puede observar el nombre completo con el que fue radicado ante las oficinas del MVCT y el nombre con el que se manejarán en esta investigación.

Tabla 3. Identificación de los proyectos de la base de datos

No.	Nombre del proyecto	ID
1	Construcción, optimización alcantarillado combinado y pluvial barrio San Cristóbal entre cras 16 y 19 con calles 3a y 5d y barrio San Luis entre cras 13 y 15 con calles 2 y 3 m/pio De Piedecuesta Santander.	San Luis
2	Optimización del sistema de alcantarillado vereda el encano, municipio de Buesaco, Nariño.	EL Encano
3	Construcción y optimización de las redes de alcantarillado sanitario del barrio el millón, municipio de el molino-la guajira, caribe.	El Molino
4	Optimización del sistema de alcantarillado vereda San Ignacio, municipio de Buesaco Nariño.	San Ignacio
5	Revisión, actualización y elaboración de estudios y diseños de los sistemas de acueducto y alcantarillado de corregimientos pertenecientes a los municipios de Riohacha, San Juan del Cesar, Fonseca, Manaure, Distracción, Maicao y Barrancas.	La Peña
6	Diagnóstico, diseños y planes de obras e inversiones de los sistemas de acueducto y alcantarillado del municipio de El Retén, Magdalena.	El Retén
7	Plan maestro de alcantarillado pluvial fase 1 del municipio de Sibaté, Cundinamarca.	Sibaté
8	Diseño red pluvial urbanización volver a vivir en Apulo, Cundinamarca	Apulo
9	Ajuste, actualización, terminación o formulación de planes maestros de los sistemas de acueducto y alcantarillado en zonas urbanas y centros nucleados del departamento de Cundinamarca	Beltrán
10	Construcción de las redes de alcantarillado sanitario y pluvial de las etapas 17 y 18 barrio la florida 1, la florida2, la pradera 1, la pradera 2, cien familias, bosques de cipi de la comuna 6 del municipio de Soacha, Cundinamarca	Soacha

No.	Nombre del proyecto	ID
11	Diagnóstico, diseño y planes de obras e inversiones de los sistemas de acueducto y alcantarillado del corregimiento de Guáimaro- Magdalena	Guáimaro
12	Diagnóstico, diseño y planes de obras e inversiones de los sistemas de acueducto y alcantarillado para el municipio de Concordia, Magdalena	Concordia
13	Elaboración de los estudios y diseños de los planes maestros de acueducto y alcantarillado de las zonas urbanas de los municipios del departamento de Antioquia	Caracolí
14	Revisión, actualización y elaboración de estudios y diseños de los sistemas de acueducto y alcantarillado de corregimientos pertenecientes a los municipios de Riohacha, San Juan del Cesar, Fonseca, Manaure, Distracción, Maicao y Barrancas	La Junta

4.1 Red San Luis

Este es una red diseñada para transportar aguas residuales combinadas. Cuenta con 14 tuberías y 11 nodos incluyendo la descarga. La red se localiza en el municipio de Piedecuesta, Santander y los documentos del proyecto lo ubican en el año 2013. Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning, con un coeficiente de 0.009 y según el estudio de los diseñadores el proyecto está clasificado como de nivel de complejidad alto.

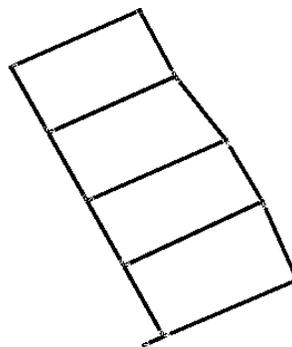


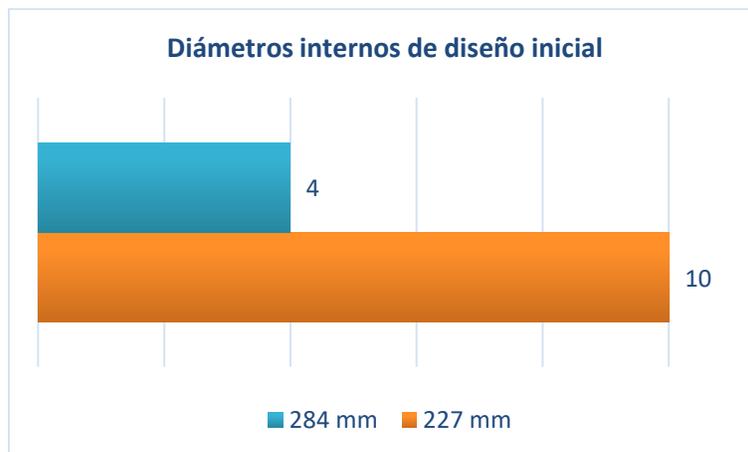
Ilustración 4. Topología de la red San Luis

Consultando las memorias del diseño hidráulico del proyecto de la red fue posible analizar las condiciones de los parámetros que se compararan con el diseño optimizado de la misma. Según esto y la normativa que rige al proyecto en condiciones de velocidad máxima y mínima, todas las tuberías lo cumplen, de la misma manera que el esfuerzo cortante mínimo. En caso de la profundidad de excavación el límite máximo se cumple contrario al límite mínimo, es decir, el recubrimiento.



Gráfica 3. Recubrimiento de excavación promedio diseño inicial según el límite mínimo. Red San Luis

Para el diseño optimizado de la red San Luis, se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 4. Diámetros internos de diseño inicial red San Luis

Tabla 4. Costos de la red San Luis con las diferentes ecuaciones

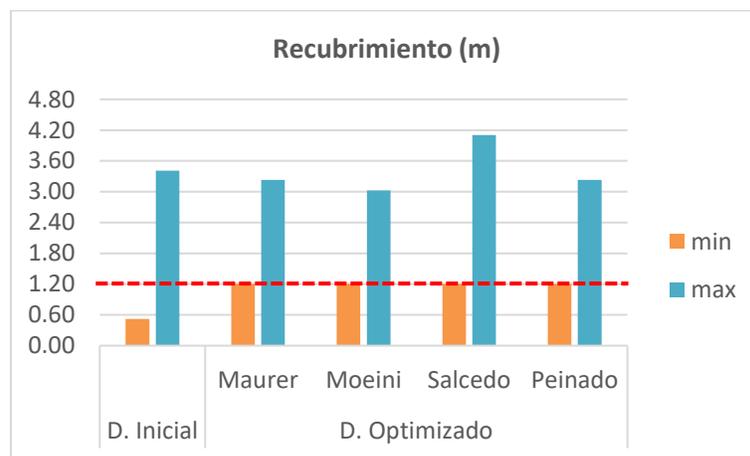
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Maurer (USD)	\$ 278,581	\$ 278,349	99.92
Moeini (IRR)	\$ 55,847	\$ 54,356	97.33
Salcedo (COP)	\$ 100,023,097	\$ 83,360,275	83.34
Peinado (COP)	\$ 83,793,919	\$ 78,615,170	93.82

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

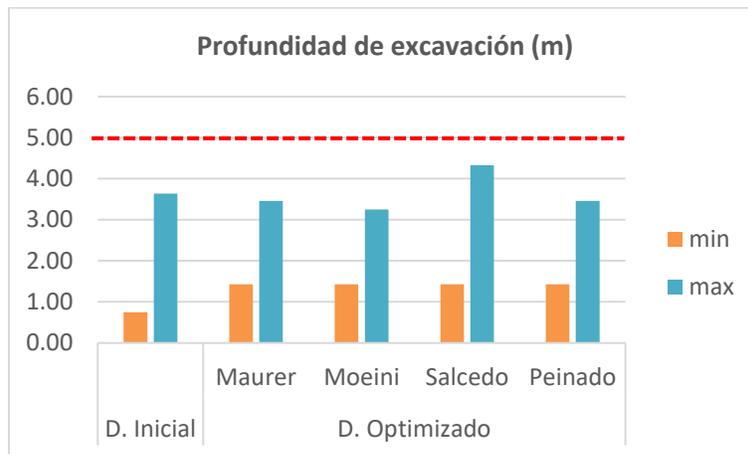
Tabla 5. Parámetros hidráulicos de la red San Luis

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	0.52	1.20	1.20	1.20	1.20
	max	3.41	3.23	3.02	4.10	3.23
Profundidad de excavación (m)	min	0.75	1.43	1.43	1.43	1.43
	max	3.64	3.46	3.25	4.33	3.46
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.54	0.65	0.65	0.64	0.65
	max	1.96	2.91	2.72	2.72	2.91
Relación de llenado (%)	min	12%	12%	12%	24%	12%
	max	82%	85%	83%	83%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	3.39	1.03	1.03	1.00	1.03
	max	10.02	16.42	13.79	13.79	16.42

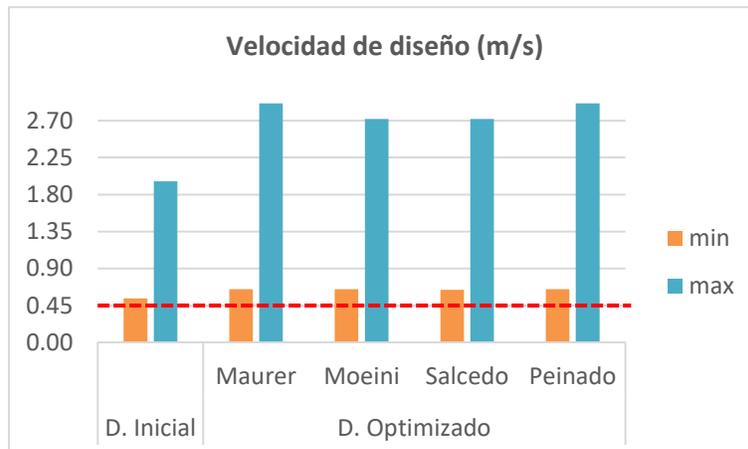
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



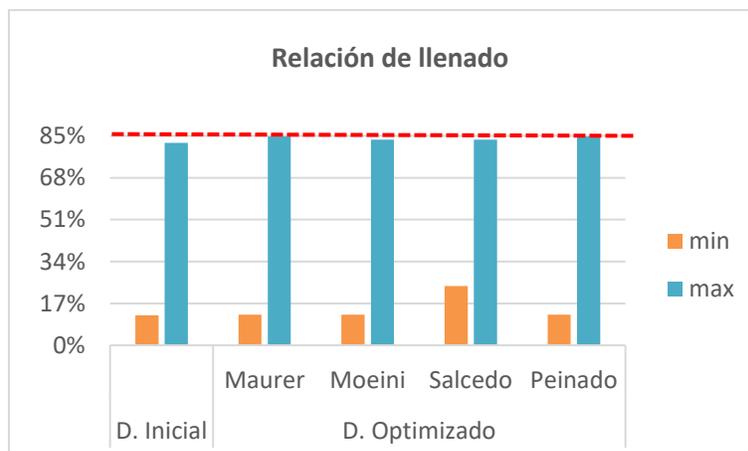
Gráfica 5. Valores del recubrimiento de la red San Luis



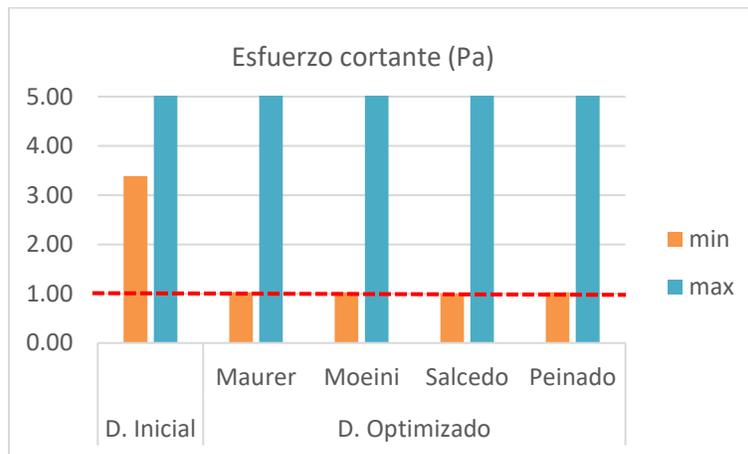
Gráfica 6. Valores de la profundidad de excavación de la red San Luis



Gráfica 7. Valores de la velocidad de diseño de la red San Luis



Gráfica 8. Valores de la relación de llenado de la red San Luis



Gráfica 9. Valores del esfuerzo cortante de la red San Luis

4.2 Red El Encano

Esta es una red diseñada para transportar aguas residuales. Cuenta con 60 tuberías y 52 nodos incluyendo la descarga. La red se localiza en el municipio de El Encano, Nariño. Fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning $n = 0.009$ y según lo establecido por los diseñadores, el proyecto está clasificado con nivel de complejidad bajo.

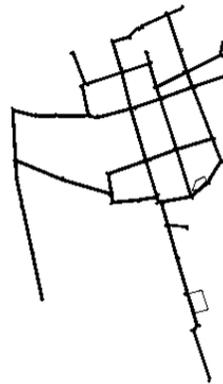
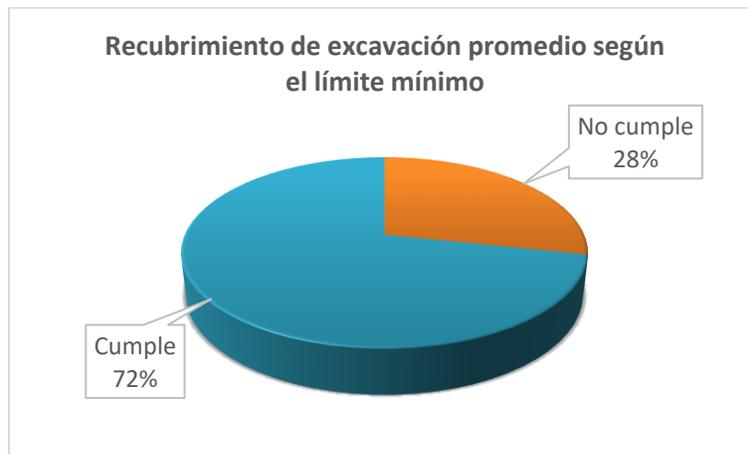
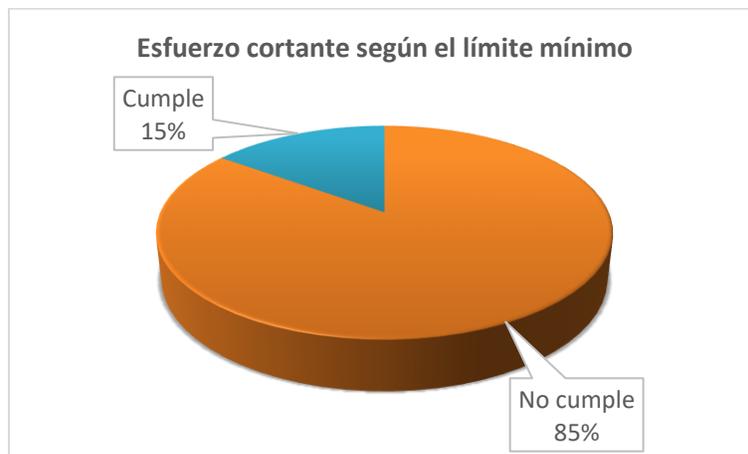


Ilustración 5. Topología de la red El Encano

Según las memorias del diseño hidráulico de la red, los valores de los parámetros hidráulicos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, exceptuando esfuerzo cortante y profundidad de excavación, ambos incumplidos en el valor mínimo permitido.

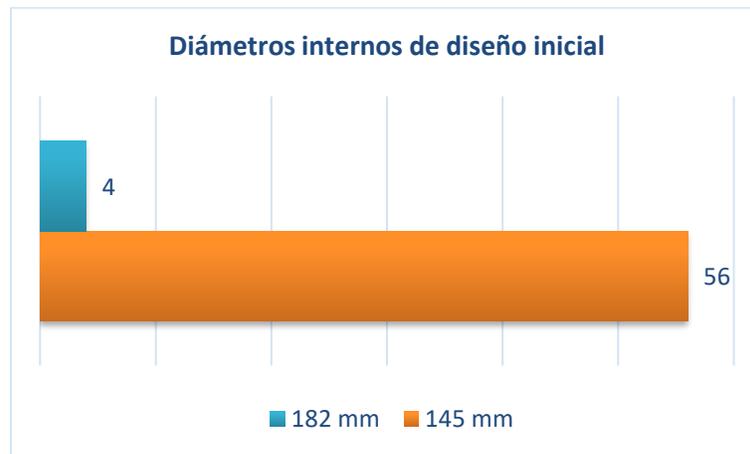


Gráfica 10. Recubrimiento de excavación promedio del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Encano



Gráfica 11. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Encano

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 12. Diámetros internos de diseño inicial red El Encano

Tabla 6. Costos de la red El Encano con las diferentes ecuaciones

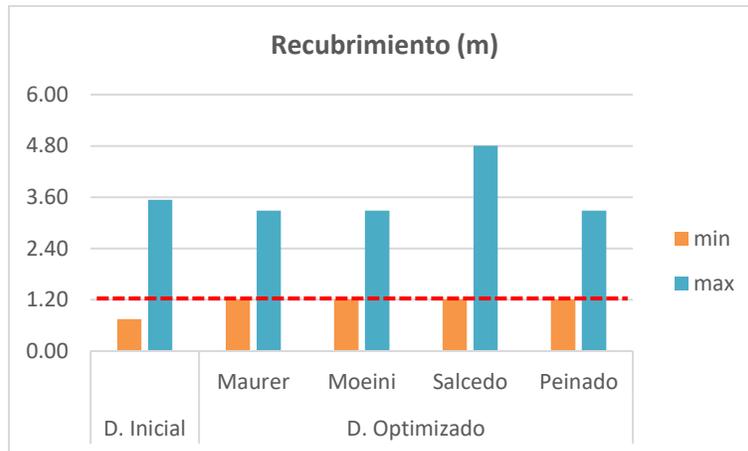
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 1,221,408	\$ 1,415,288	115.87
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 270,694	\$ 288,486	106.57
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 399,256,516	\$ 406,538,957	101.82
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 325,016,862	\$ 362,996,360	111.69

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

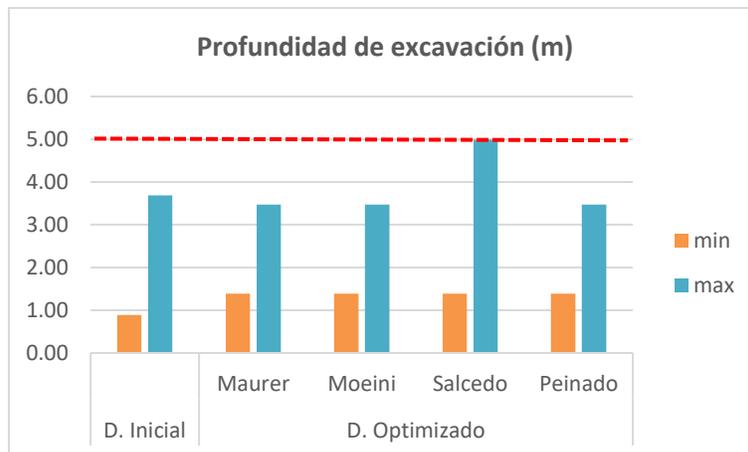
Tabla 7. Parámetros hidráulicos de la red El Encano

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.75	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	3.54	3.29	3.29	4.81	3.29
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.89	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	3.69	3.47	3.47	4.99	3.47
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.50	0.57	0.57	0.57	0.57
	<i>max</i>	1.69	2.09	2.09	1.83	2.09
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	2%	7%	7%	7%	7%
	<i>max</i>	80%	53%	53%	53%	53%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	0.15	1.00	1.00	1.00	1.00
	<i>max</i>	2.15	17.55	17.55	12.83	17.55

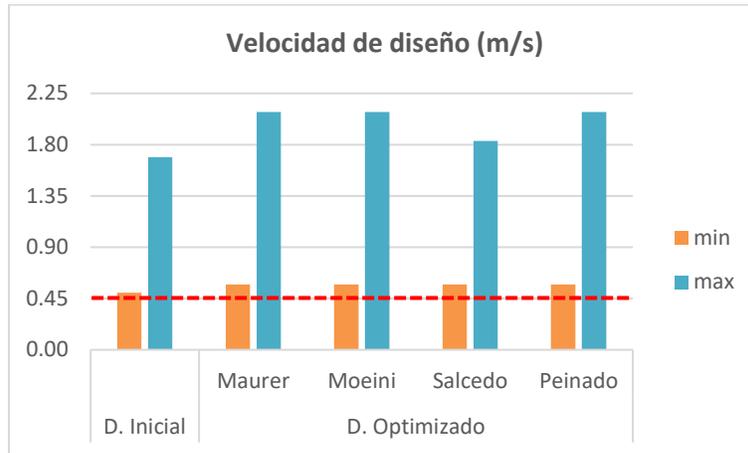
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



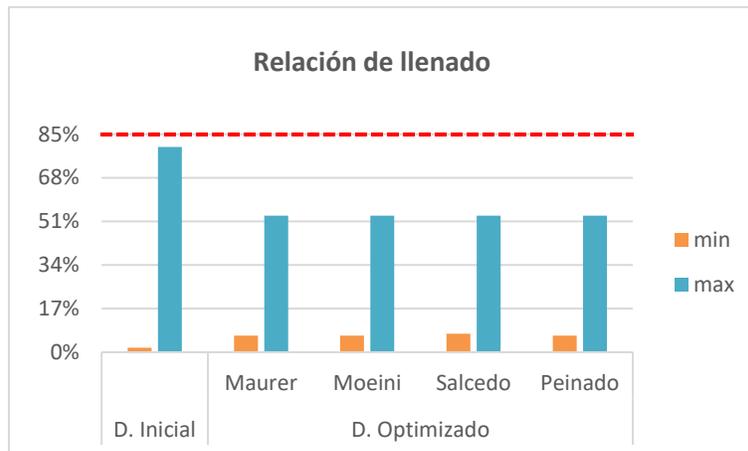
Gráfica 13. Valores del recubrimiento de la red El Encano



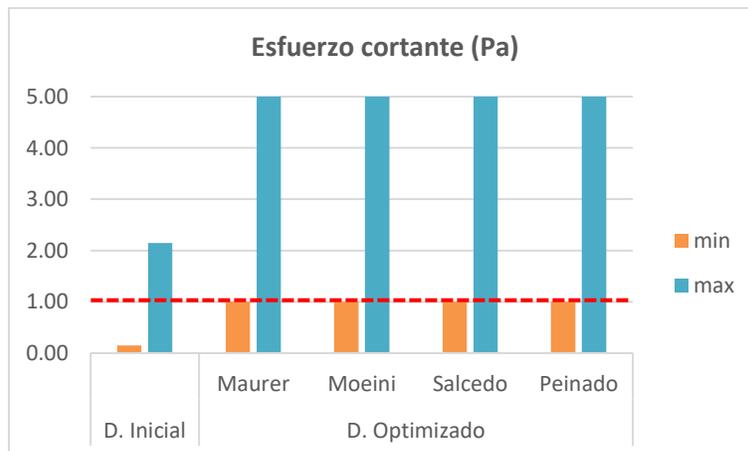
Gráfica 14. Valores de la profundidad de excavación de la red El Encano



Gráfica 15. Valores de la velocidad de diseño de la red El Encano



Gráfica 16. Valores de la relación de llenado de la red El Encano



Gráfica 17. Valores del esfuerzo cortante de la red El Encano

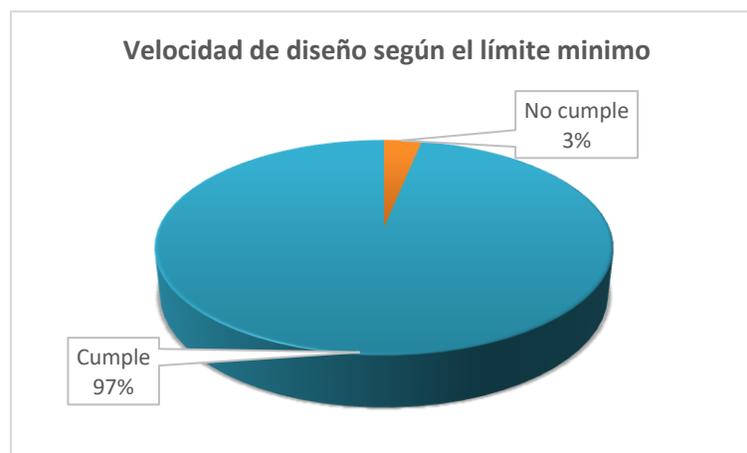
4.3 Red El Molino

Esta es una red diseñada para transportar aguas residuales. Cuenta con 61 tuberías y 53 nodos incluyendo la descarga. La red se localiza en el barrio El Millón del municipio El Molino, La Guajira. Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Darcy-Weisbach con un valor del coeficiente de rugosidad absoluta K_s igual a 0.00015 mm, el proyecto está clasificado con nivel de complejidad medio.



Ilustración 6. Topología de la red El Molino

En las siguientes graficas se puede apreciar los parámetros en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones pudo constatar que el valor de la velocidad, recubrimiento y esfuerzo cortante en muchos tramos se encuentran bajo el límite mínimo permisible.



Gráfica 18. Velocidad del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino

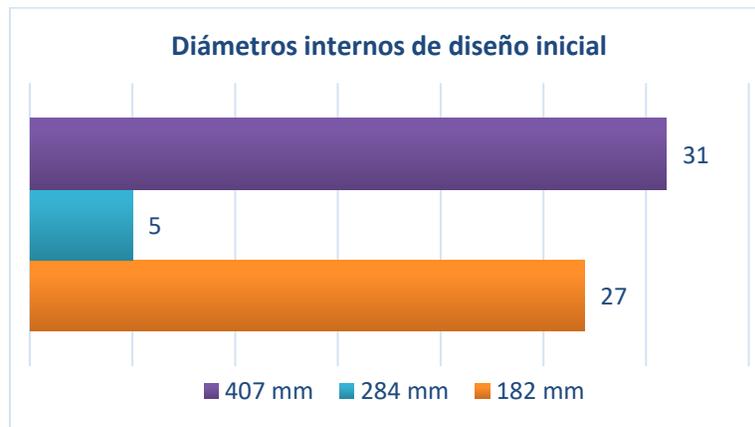


Gráfica 19. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino



Gráfica 20. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Red El Molino

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 21. Diámetros internos de diseño inicial red El Molino

Tabla 8. Costos de la red El Molino con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 2,878,762	\$ 3,526,278	122.49
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 489,164	\$ 640,040	130.84
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 757,039,270	\$ 1,164,884,867	153.87
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 813,564,675	\$ 885,886,273	108.89

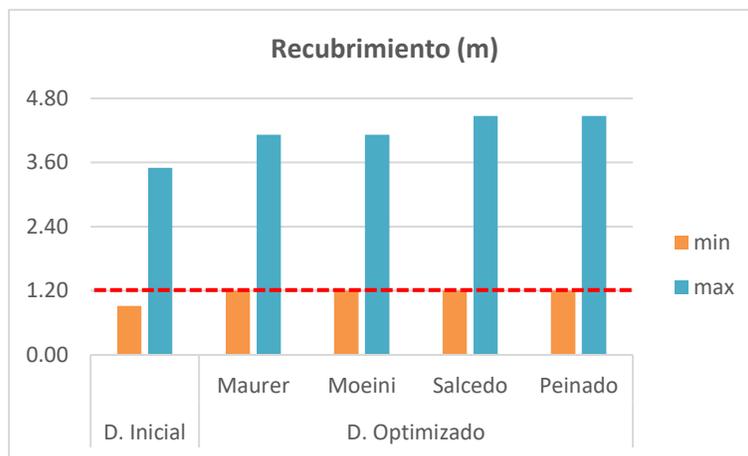
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente. El esfuerzo cortante, a pesar de que la norma toma como valor mínimo 1 Pa, el proyecto en su documento recomendaba 1.5 Pa y sobre este último valor fue que se realizó la optimización.

Tabla 9. Parámetros hidráulicos de la red El Molino

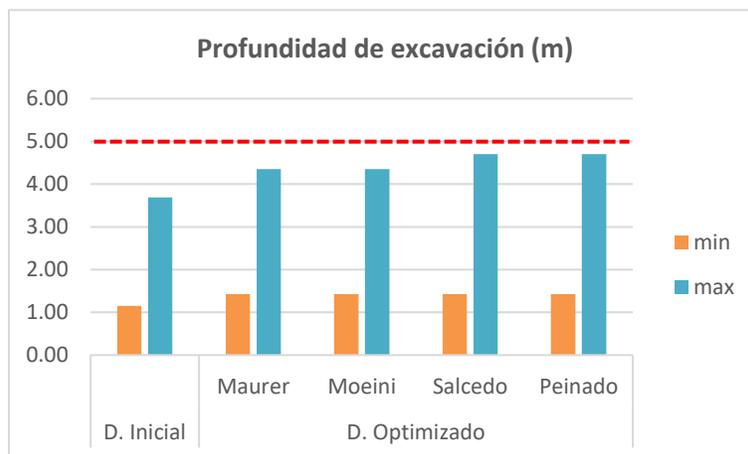
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.92	1.20	1.20	1.20	1.20
	<i>max</i>	3.50	4.12	4.12	4.47	4.47
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.15	1.43	1.43	1.43	1.43
	<i>max</i>	3.69	4.35	4.35	4.7	4.7
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.34	0.65	0.65	0.73	0.73
	<i>max</i>	3.15	2.44	2.44	2.34	2.85
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	7%	8%	8%	7%	7%
	<i>max</i>	71%	85%	85%	85%	85%

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	0.33	1.50	1.50	1.50	1.50
	max	15.61	13.24	13.24	8.87	12.82

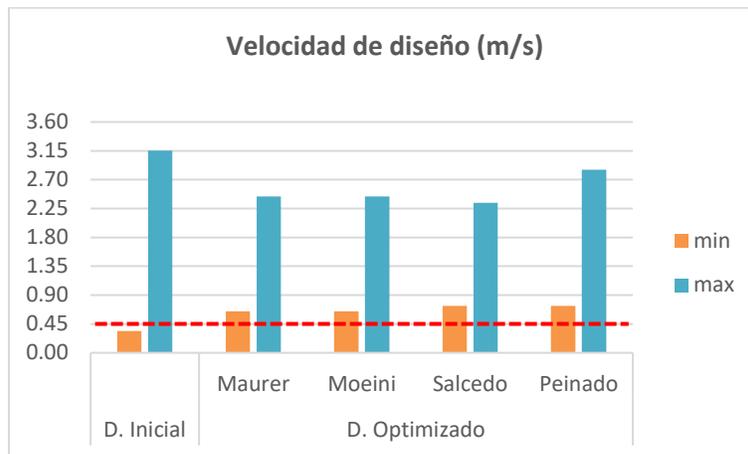
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



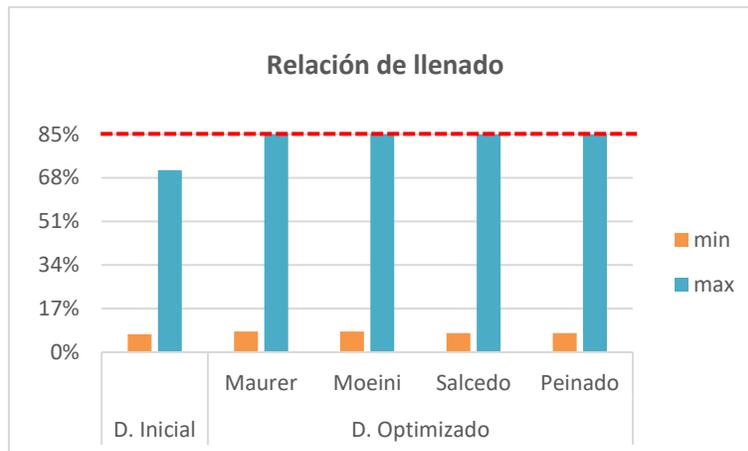
Gráfica 22. Valores del recubrimiento de la red El Molino



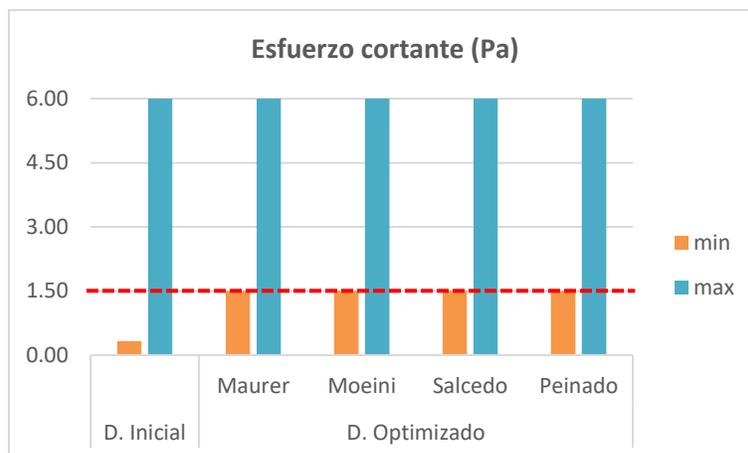
Gráfica 23. Valores de la profundidad de excavación de la red El Molino



Gráfica 24. Valores de la velocidad de diseño de la red El Molino



Gráfica 25. Valores de la relación de llenado de la red El Molino



Gráfica 26. Valores del esfuerzo cortante de la red El Molino

4.4 Red San Ignacio

Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.01$) y según lo establecido por los diseñadores, el proyecto está clasificado con nivel de complejidad bajo, cuenta con 48 tuberías y 48 nodos incluyendo la descarga.

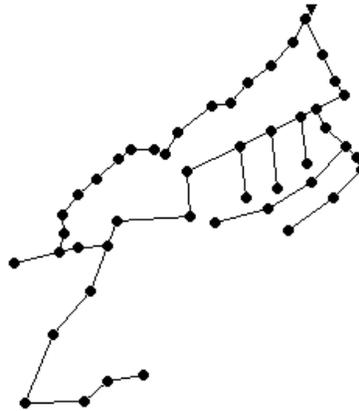
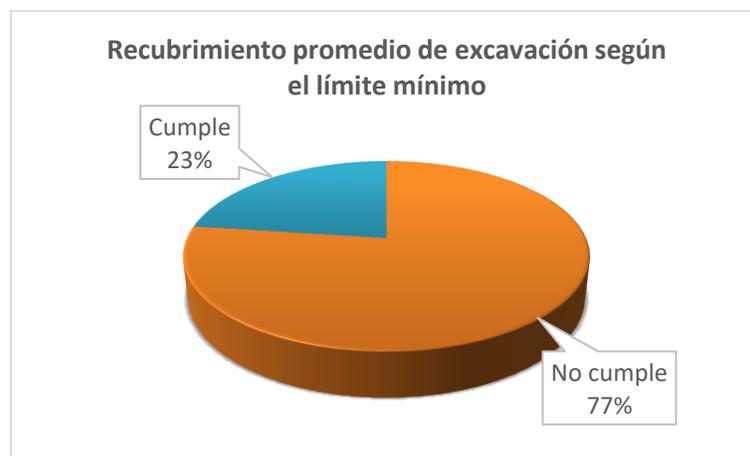


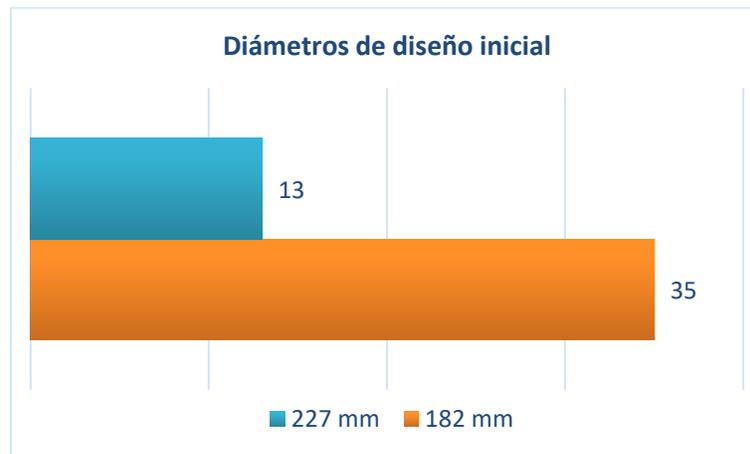
Ilustración 7. Topología de la red San Ignacio

Según las memorias del diseño hidráulico de la red, los valores de los parámetros hidráulicos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, exceptuando el recubrimiento de excavación mínima.



Gráfica 27. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red San Ignacio

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 28. Diámetros internos de diseño inicial red San Ignacio

Tabla 10. Costos de la red San Ignacio con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 584,824	\$ 619,382	105.91
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 110,722	\$ 124,110	112.09
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 236,309,128	\$ 245,131,997	103.73
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 213,770,742	\$ 211,499,857	98.94

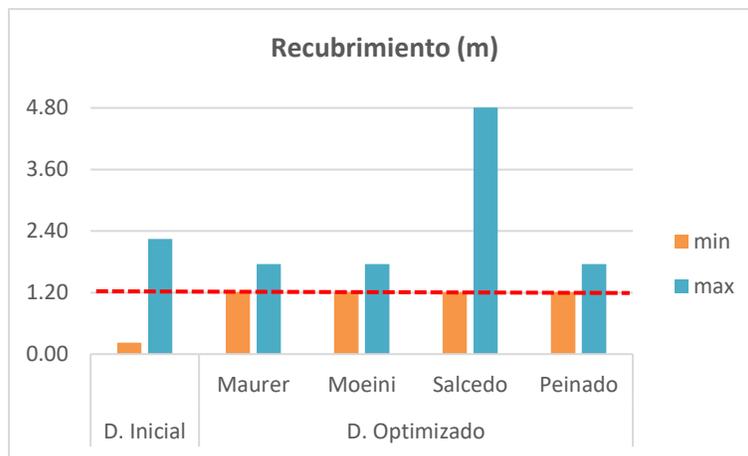
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente. El esfuerzo cortante, a pesar de que la norma toma como valor mínimo 1 Pa, el proyecto en su documento recomendaba 1.5 Pa y sobre este último valor fue que se realizó la optimización.

Tabla 11. Parámetros hidráulicos de la red San Ignacio

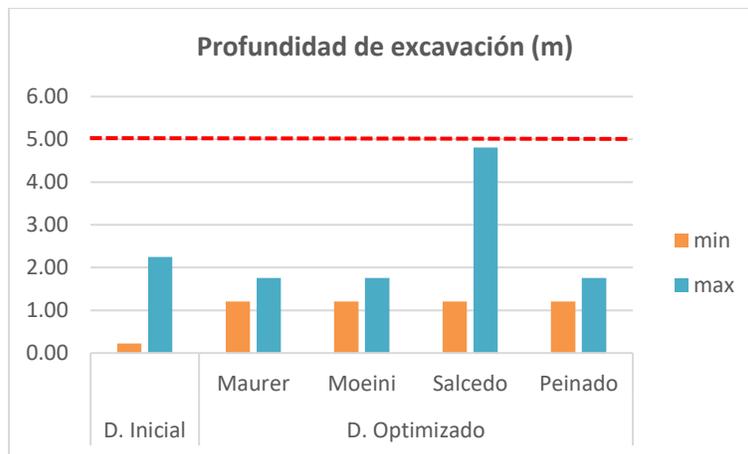
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.23	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	2.25	1.76	1.76	4.81	1.76
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.48	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	2.45	1.94	1.94	4.99	1.94
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.71	0.63	0.63	0.63	0.63
	<i>max</i>	4.05	3.61	3.61	3.61	3.61
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	10%	7%	7%	7%	7%
	<i>max</i>	25%	18%	18%	18%	18%

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	0.71	1.52	1.52	1.52	1.52
	max	4.05	53.83	53.83	53.83	53.83

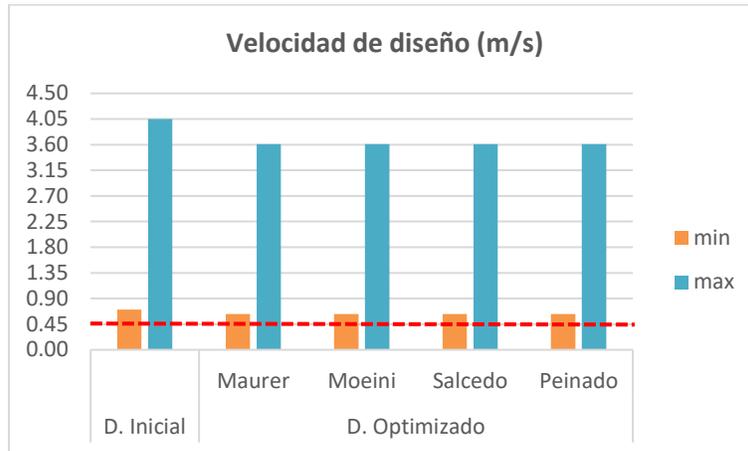
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



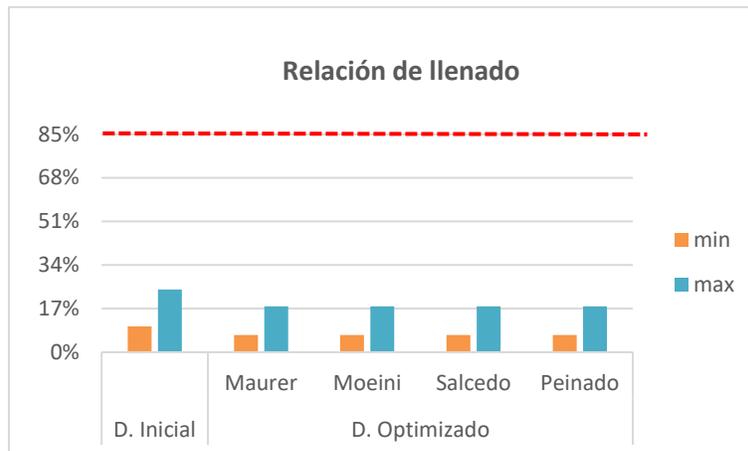
Gráfica 29. Valores del recubrimiento de la red San Ignacio



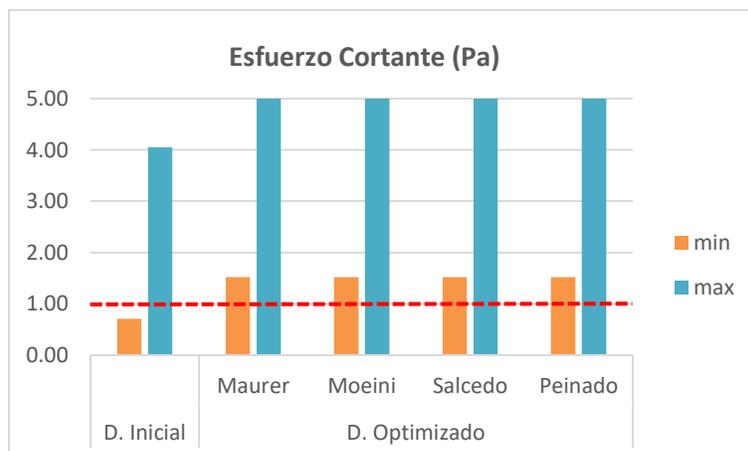
Gráfica 30. Valores de la profundidad de excavación de la red San Ignacio



Gráfica 31. Valores de la velocidad de diseño de la red San Ignacio



Gráfica 32. Valores de la relación de llenado de la red San Ignacio



Gráfica 33. Valores del esfuerzo cortante de la red San Ignacio

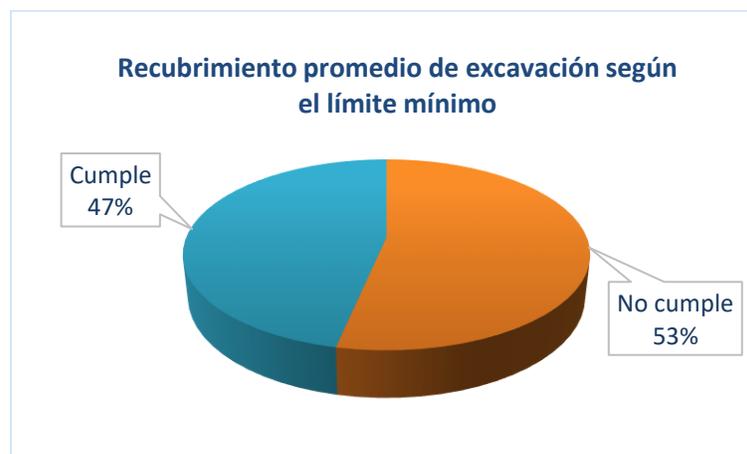
4.5 Red La Peña

Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.01$) y según lo establecido por los diseñadores, el proyecto está clasificado con nivel de complejidad bajo, cuenta con 75 tuberías y 71 nodos incluyendo la descarga.

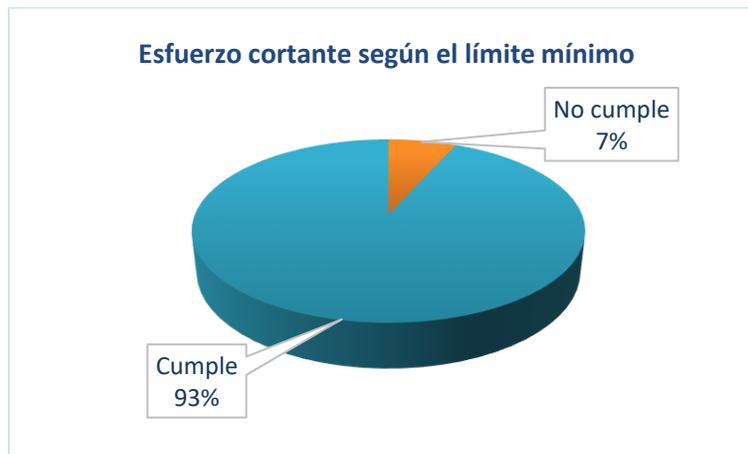


Ilustración 8. Topología de la red La Peña

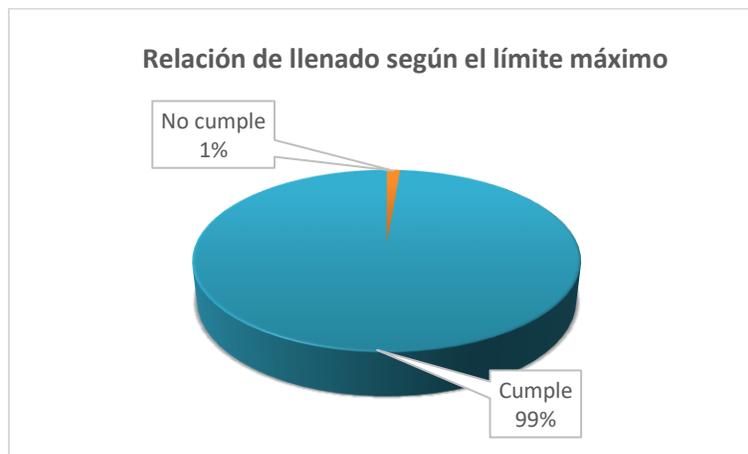
En las siguientes gráficas se puede apreciar los parámetros hidráulicos en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones pudo constatar que el valor del recubrimiento de excavación mínima, esfuerzo cortante en muchos tramos se encuentran bajo el límite mínimo permisible. Además la red supera la relación de llenado máxima permitida.



Gráfica 34. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña



Gráfica 35. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña



Gráfica 36. Relación de llenado de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Peña

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 37. Diámetros internos de diseño inicial red La Peña

Tabla 12. Costos de la red La Peña con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 2,338,109	\$ 2,008,154	85.89
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 480,385	\$ 441,932	92.00
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 700,714,140	\$ 558,114,193	79.65
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 594,354,210	\$ 566,250,370	95.27

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente. El esfuerzo cortante, a pesar de que la norma toma como valor mínimo 1 Pa, el proyecto en su documento recomendaba 1.2 Pa y sobre este último valor fue que se realizó la optimización.

Tabla 13. Parámetros hidráulicos de la red La Peña

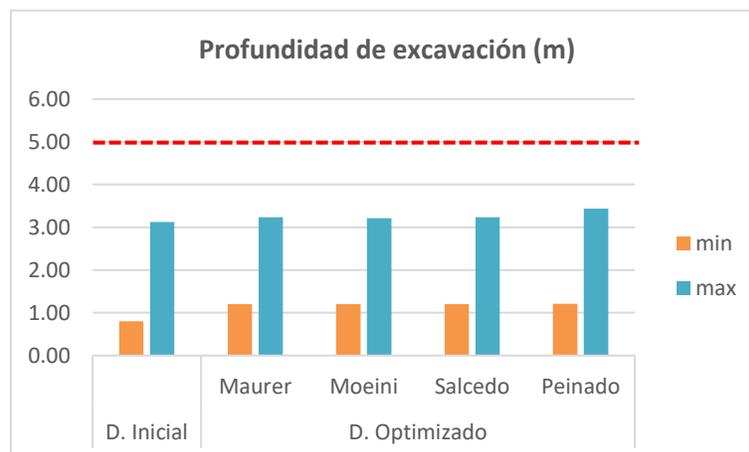
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.80	1.20	1.20	1.20	1.21
	<i>max</i>	3.13	3.23	3.21	3.23	3.44
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.98	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	3.35	3.46	3.44	3.46	3.62
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.49	0.57	0.57	0.57	0.57
	<i>max</i>	1.52	1.67	1.67	1.48	1.44
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	3%	13%	13%	13%	13%
	<i>max</i>	95%	82%	82%	85%	85%

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
	max	8.79	7.26	7.26	5.50	5.35

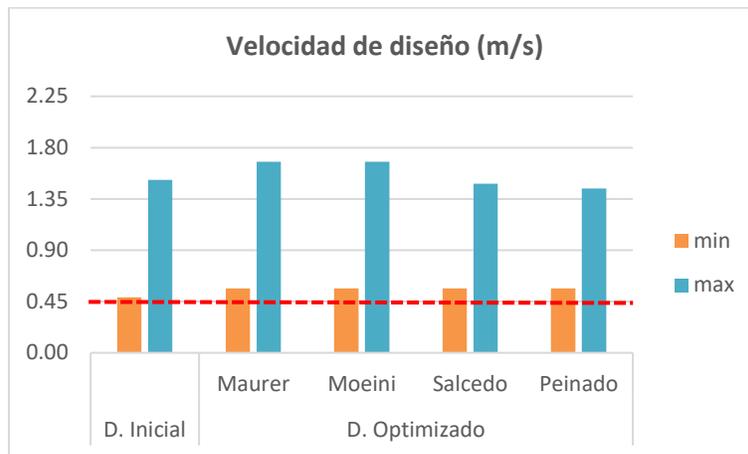
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



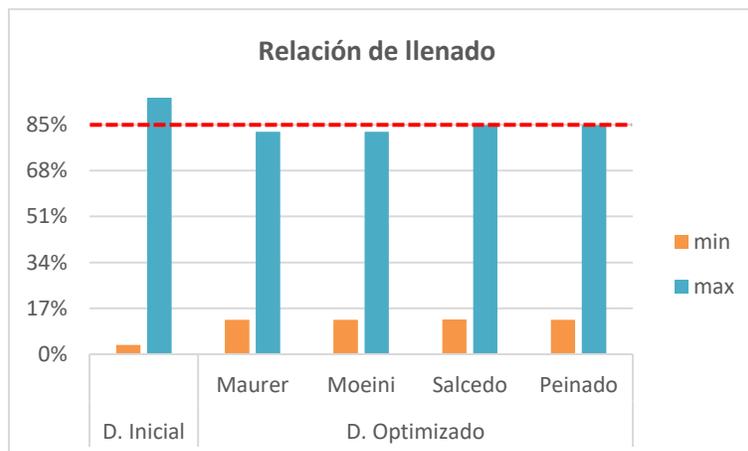
Gráfica 38. Valores del recubrimiento de la red La Peña



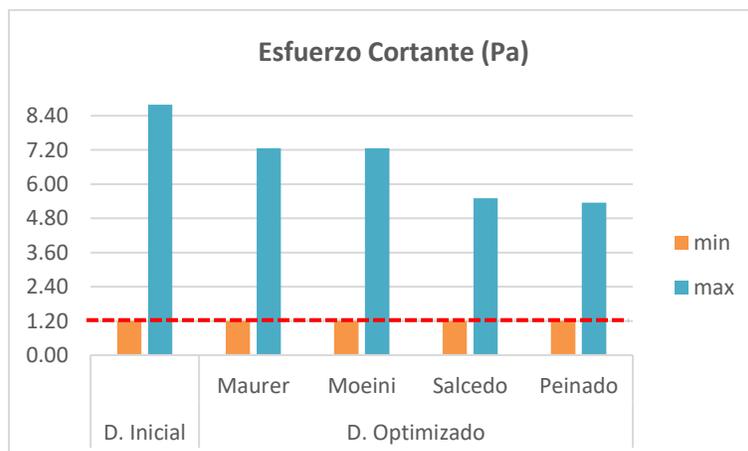
Gráfica 39. Valores de la profundidad de excavación de la red La Peña



Gráfica 40. Valores de la velocidad de diseño de la red La Peña



Gráfica 41. Valores de la relación de llenado de la red La Peña



Gráfica 42. Valores del esfuerzo cortante de la red La Peña

4.6 Red El Retén

Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.01$) para recolectar y transportar las aguas residuales del municipio El Retén, Magdalena. Cuenta con 376 tuberías y 377 nodos incluyendo la descarga.

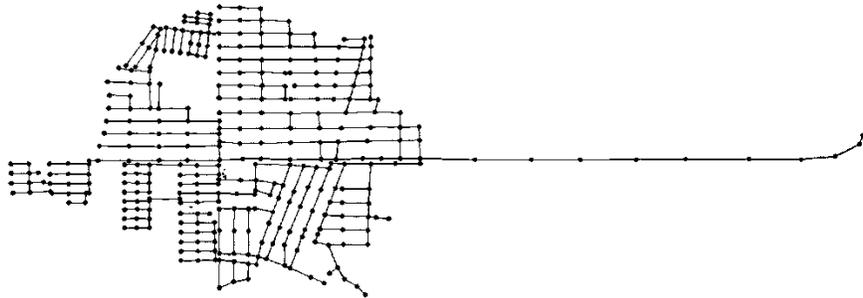
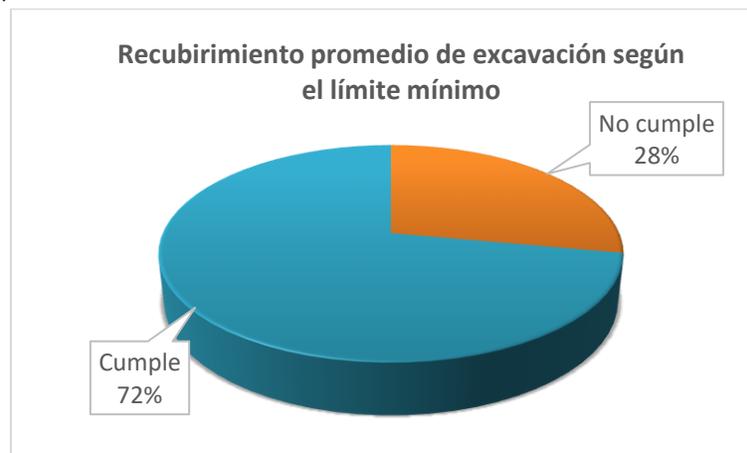
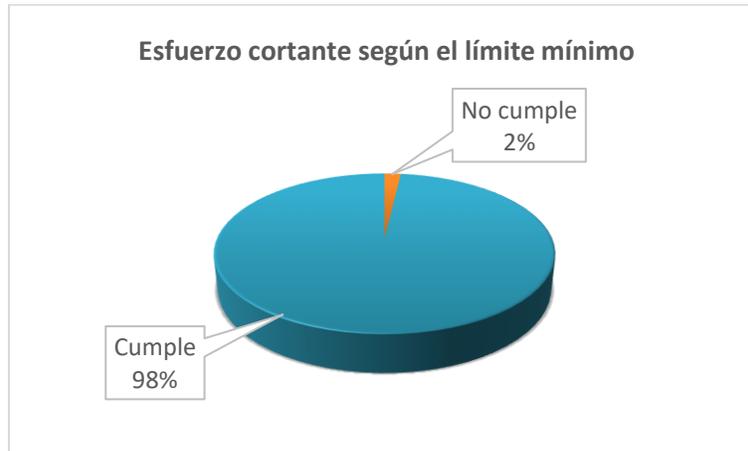


Ilustración 9. Topología de la red El Retén

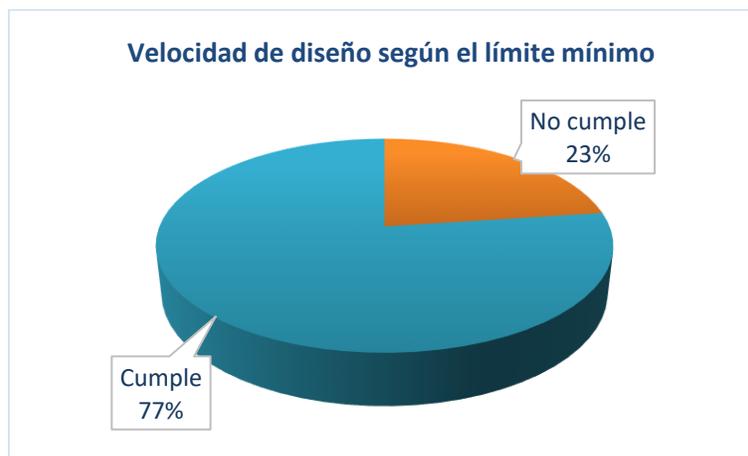
En las siguientes graficas se puede apreciar los parámetros hidráulicos en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones en las memorias de cálculo del diseño inicial viabilizado pudo constatar que el valor del recubrimiento de excavación mínima, esfuerzo cortante y la velocidad de diseño en varios tramos se encuentran bajo el límite mínimo permisible.



Gráfica 43. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén

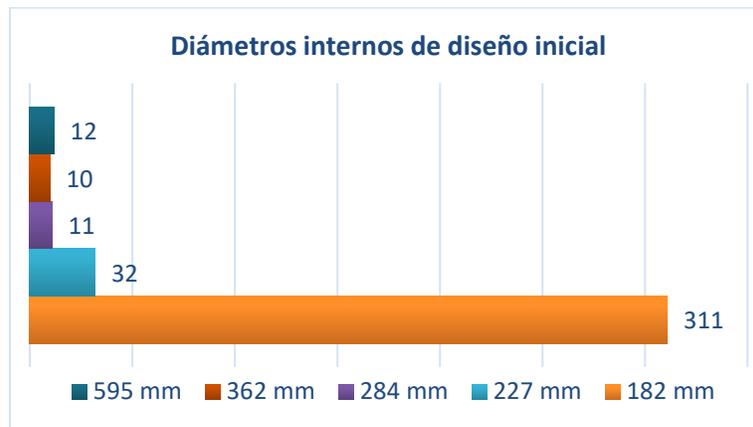


Gráfica 44. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén



Gráfica 45. Velocidad de diseño inicial según el límite mínimo. Red El Retén

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 46. Diámetros internos de diseño inicial red El Retén

Tabla 14. Costos de la red El Retén con las diferentes ecuaciones

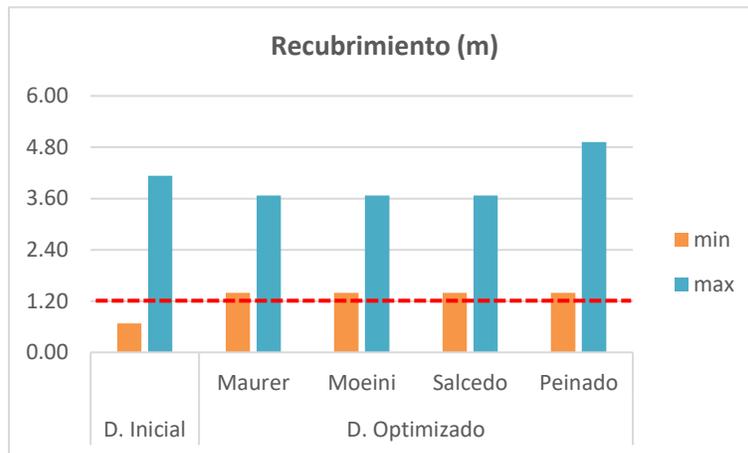
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 13,320,849	\$ 13,500,404	101.35
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 2,773,936	\$ 2,881,156	103.87
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 5,612,574,199	\$ 4,075,230,069	72.61
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 3,579,724,329	\$ 3,335,170,863	93.17

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

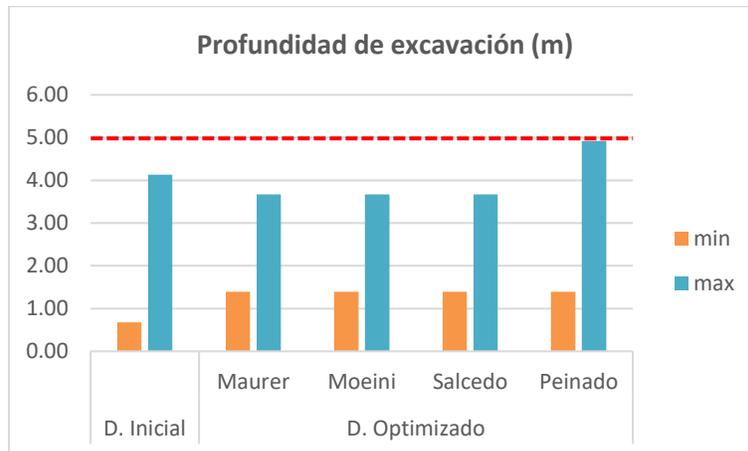
Tabla 15. Parámetros hidráulicos de la red El Retén

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.5	1.2	1.2	1.2	1.2
	<i>max</i>	3.9	3.5	3.5	3.5	4.5
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.68	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	4.13	3.67	3.67	3.67	4.92
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.44	0.52	0.52	0.52	0.52
	<i>max</i>	0.98	1.20	1.20	1.20	1.56
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	3%	12%	12%	13%	12%
	<i>max</i>	72%	85%	85%	85%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
	<i>max</i>	3.64	2.77	2.77	2.76	4.88

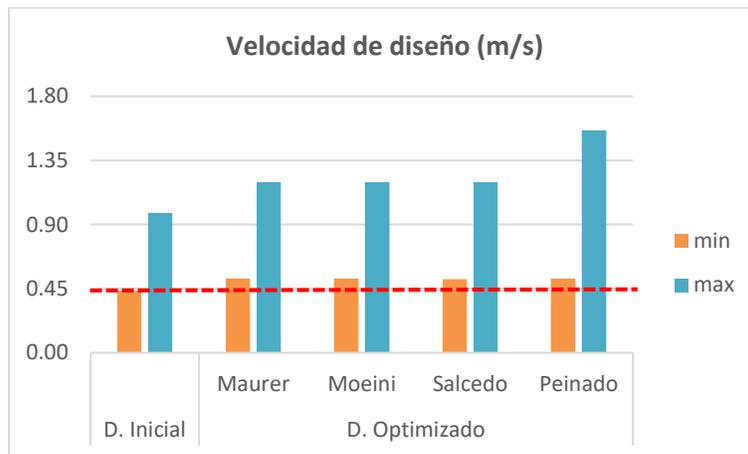
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



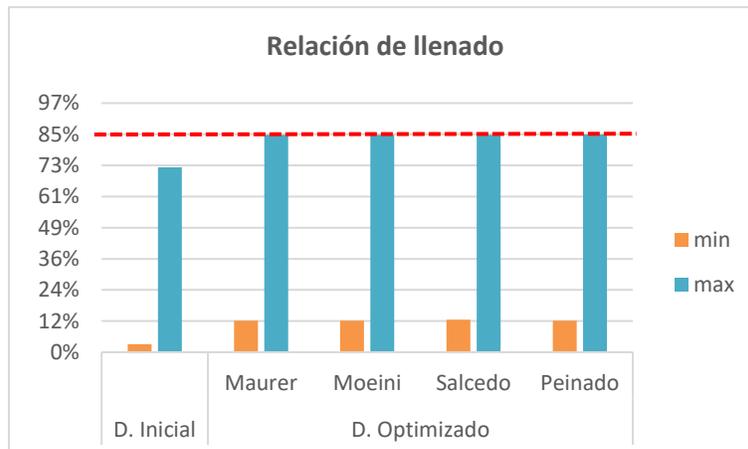
Gráfica 47. Valores del recubrimiento de la red El Retén



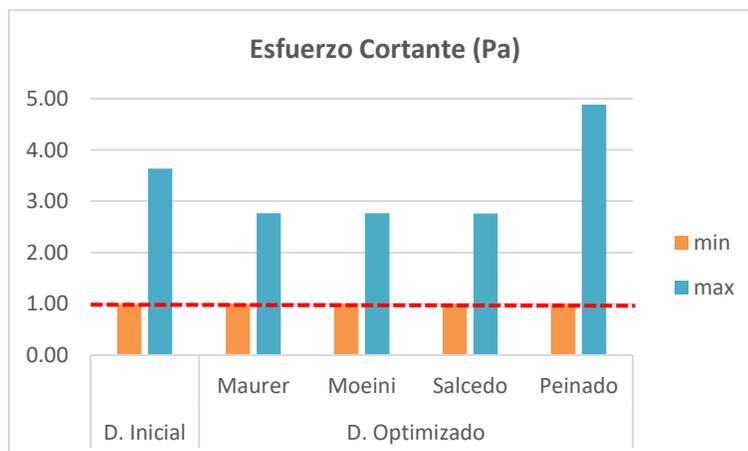
Gráfica 48. Valores de la profundidad de excavación de la red El Retén



Gráfica 49. Valores de la velocidad de diseño de la red El Retén



Gráfica 50. Valores de la relación de llenado de la red El Retén



Gráfica 51. Valores del esfuerzo cortante de la red El Retén

4.7 Red Sibaté

Esta red hace parte del sistema de recolección de aguas lluvias del municipio de Sibaté, Cundinamarca. Fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.01$). Es una red formada por dos colectores, y entre los dos suman 40 tuberías y 42 nodos incluyendo las dos descargas.

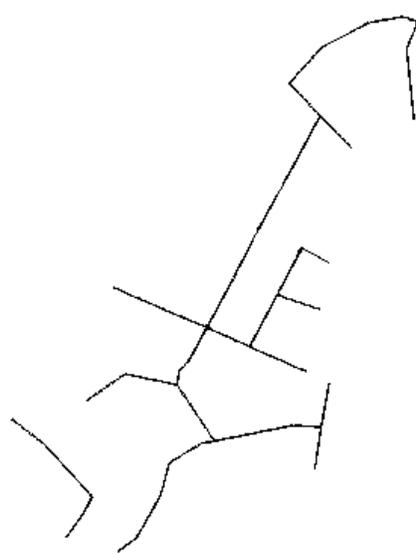
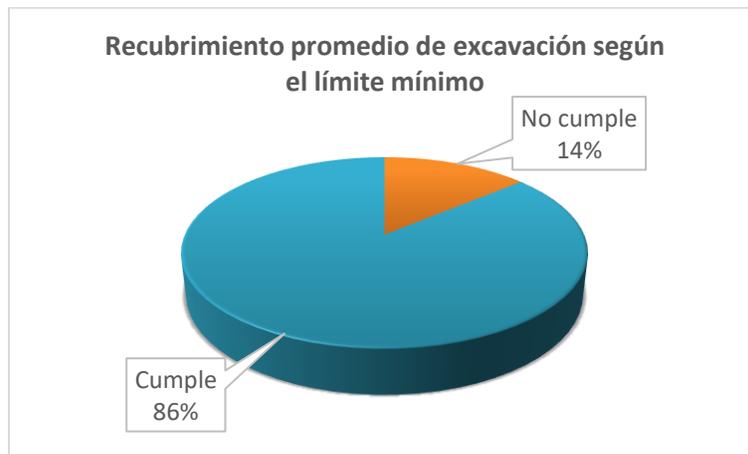


Ilustración 10. Topología de la red Sibaté

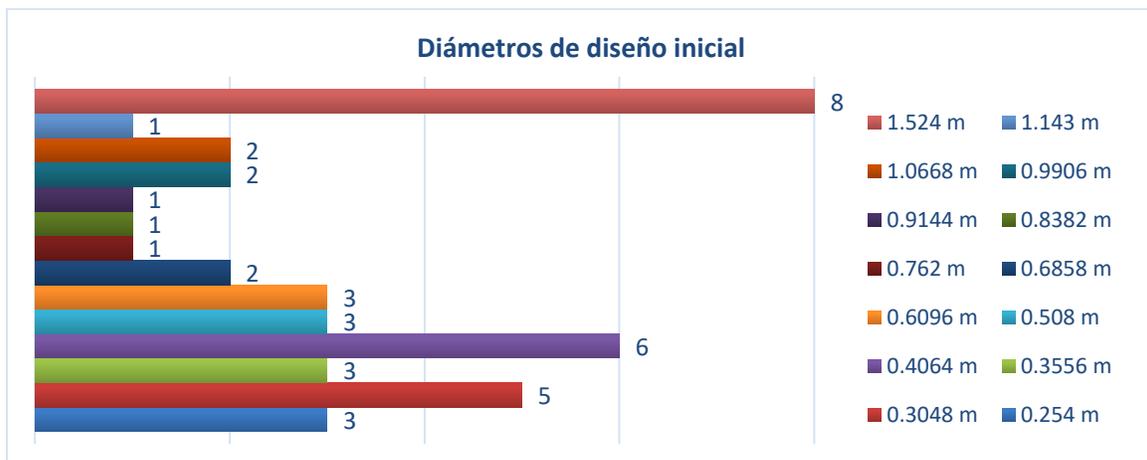
El colector más pequeño cuenta con 4 tuberías y 5 nodos y haciendo la verificación de los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta, el único que no se cumple en su totalidad es el recubrimiento mínimo de la excavación, pues solo 3 de las 5 están a una profundidad mayor o igual a 1.2 m desde la cota clave de la tubería.

En cuanto al colector más grande de la red, la siguiente gráfica evidencia que el valor del recubrimiento de excavación mínima en varios tramos se encuentra bajo el límite mínimo permisible. Este colector cuenta con 36 tuberías y 37 nodos.



Gráfica 52. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Sibaté

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 53. Diámetros internos de diseño inicial red Sibaté

Tabla 16. Costos de la red Sibaté con las diferentes ecuaciones

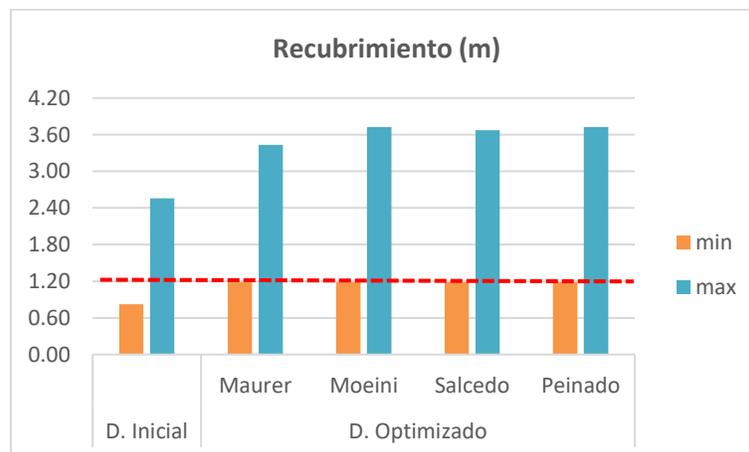
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Maurer (USD)	\$ 2,660,795	\$ 2,115,090	79.49
Moeini (IRR)	\$ 1,022,422	\$ 486,855	47.62
Salcedo (COP)	\$ 1,384,753,939	\$ 1,047,271,033	75.63
Peinado (COP)	\$ 1,129,126,236	\$ 898,656,654	79.59

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

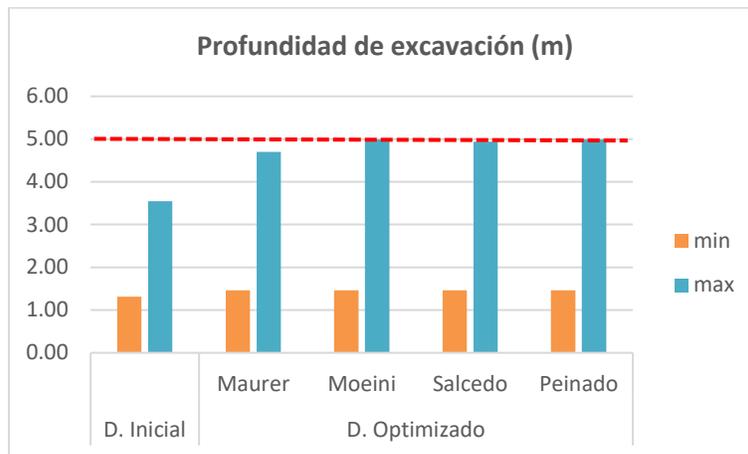
Tabla 17. Parámetros hidráulicos de la red Sibaté

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	0.82	1.2	1.2	1.2	1.2
	max	2.56	3.4	3.7	3.7	3.7
Profundidad de excavación (m)	min	1.31	1.46	1.46	1.46	1.46
	max	3.55	4.70	4.99	4.94	4.99
Velocidad de diseño (m/s)	min	1.19	1.39	1.28	1.28	1.39
	max	4.57	4.78	5.44	5.44	5.44
Relación de llenado (%)	min	40%	43%	43%	55%	43%
	max	99%	86%	86%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	3.95	3.79	3.04	3.12	3.79
	max	45.33	37.91	50.94	50.94	50.94

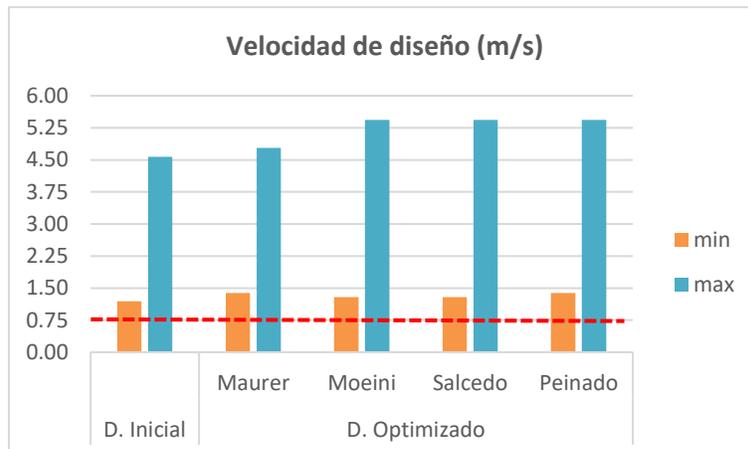
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



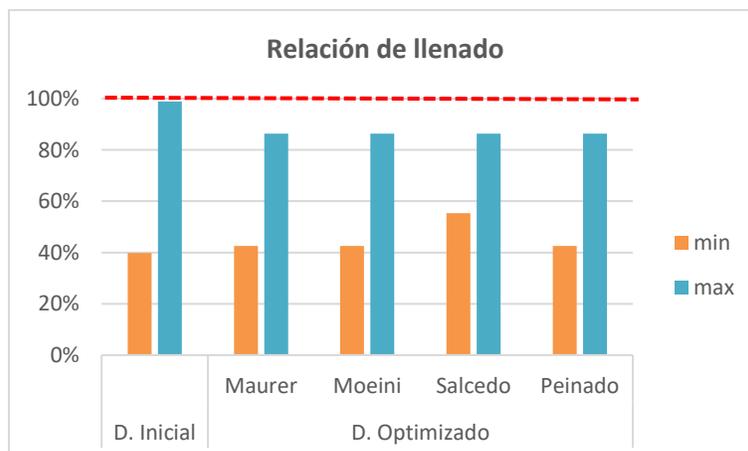
Gráfica 54. Valores del recubrimiento de la red Sibaté



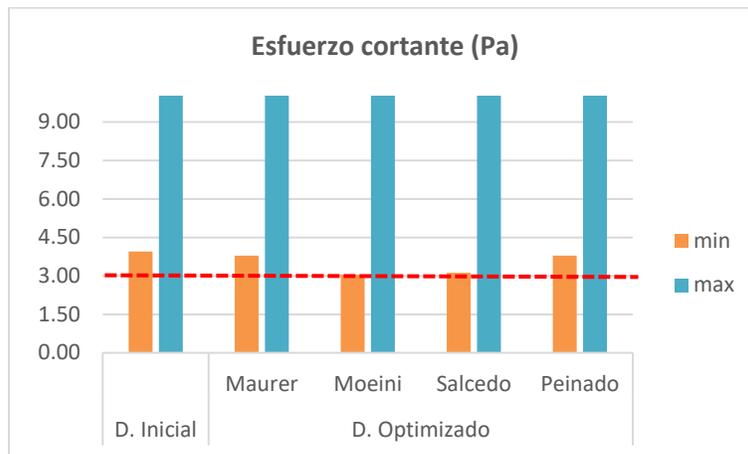
Gráfica 55. Valores de la profundidad de excavación de la red Sibaté



Gráfica 56. Valores de la velocidad de diseño de la red Sibaté



Gráfica 57. Valores de la relación de llenado de la red Sibaté



Gráfica 58. Valores del esfuerzo cortante de la red Sibaté

4.8 Red Apulo

Esta es una red de alcantarillado pluvial. Fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.009$), cuenta con 16 tramos de tuberías y 17 nodos incluyendo la descarga.

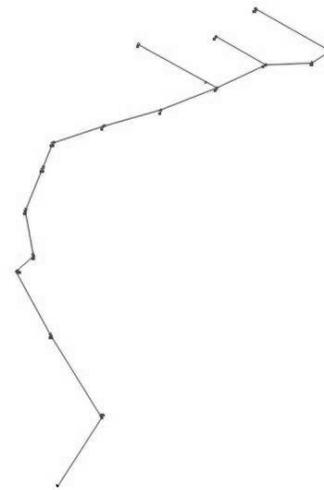


Ilustración 11. Topología de la red Apulo

Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidencio que en esta red el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo. En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de tramos de la red que infringen esta restricción.



Gráfica 59. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Apulo

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial, en este caso todas las tuberías de la red son de 254 mm. Además se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.

Tabla 18. Costos de la red Apulo con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Maurer (USD)	\$ 366,083	\$ 261,330	71.39
Moeini (IRR)	\$ 71,478	\$ 51,393	71.90
Salcedo (COP)	\$ 172,362,042	\$ 92,513,098	53.67
Peinado (COP)	\$ 103,766,426	\$ 88,151,370	84.95

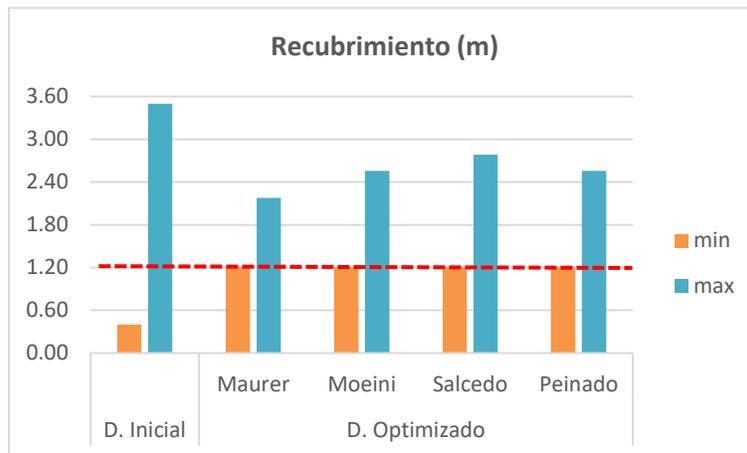
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

Tabla 19. Parámetros hidráulicos de la red Apulo

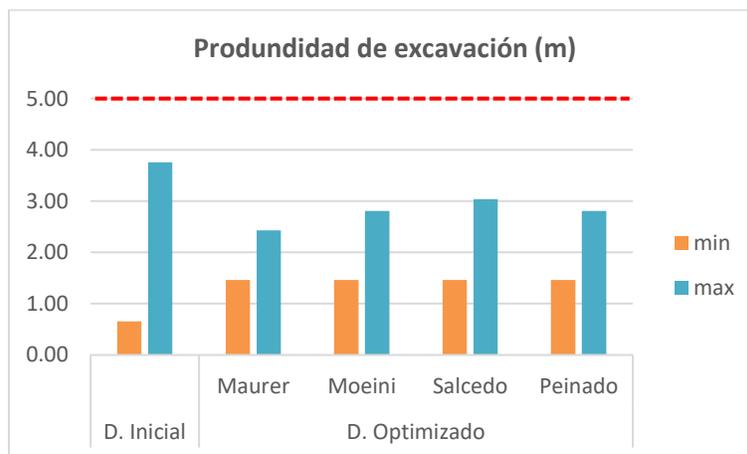
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	0.40	1.21	1.21	1.21	1.21
	max	3.50	2.18	2.56	2.79	2.56
Profundidad de excavación (m)	min	0.65	1.46	1.46	1.46	1.46
	max	3.75	2.43	2.81	3.04	2.81
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.83	0.75	1.08	1.06	1.08
	max	7.59	7.38	7.38	7.38	7.38

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Relación de llenado (%)	min	46%	12%	12%	16%	12%
	max	92%	72%	56%	68%	56%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	29.96	3.00	3.00	3.00	3.00
	max	2524.75	136.68	136.68	136.68	136.68

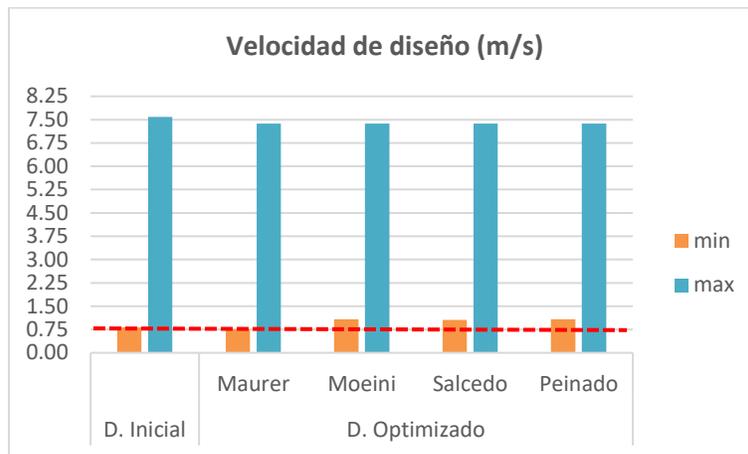
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



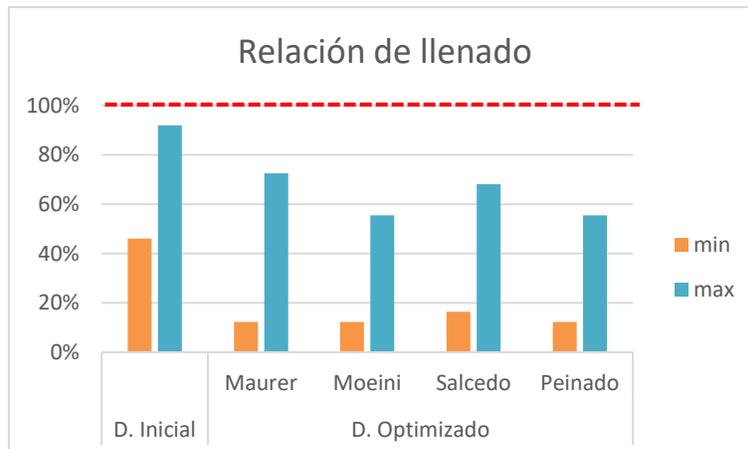
Gráfica 60. Valores del recubrimiento de la red Apulo



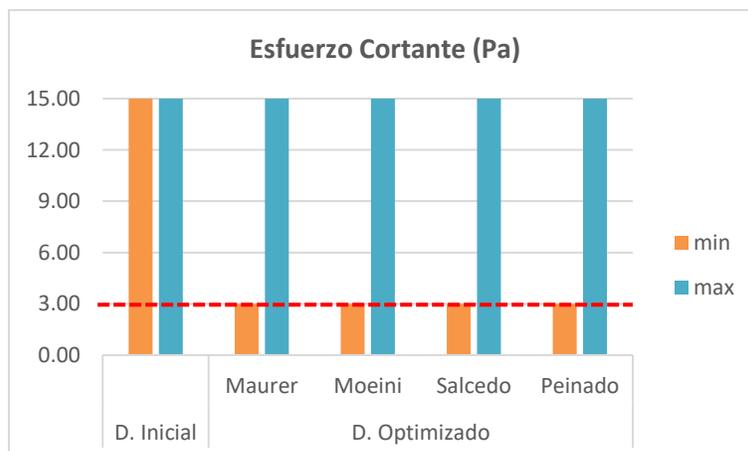
Gráfica 61. Valores de la profundidad de excavación de la Apulo



Gráfica 62. Valores de la velocidad de diseño de la red Apulo



Gráfica 63. Valores de la relación de llenado de la red Apulo



Gráfica 64. Valores del esfuerzo cortante de la red Apulo

4.9 Red Beltrán

Esta es una red pluvial de 4 colectores con descargas independientes. Fue diseñada con la ecuación de Manning ($n=0.011$), en totalidad la red se compone de 29 tuberías y 33 nodos incluyendo las descargas.

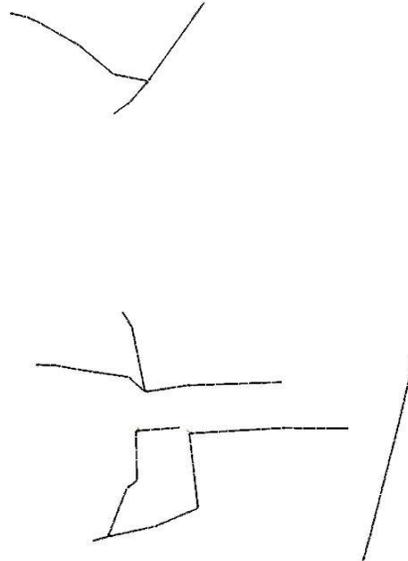
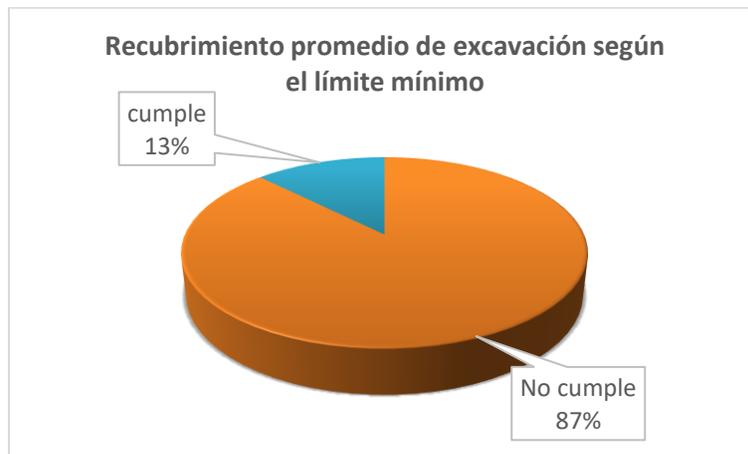


Ilustración 12. Topología de la red Beltrán

Para realizar la optimización de la red y las debidas verificaciones es necesario individualizar los colectores que la conforman.

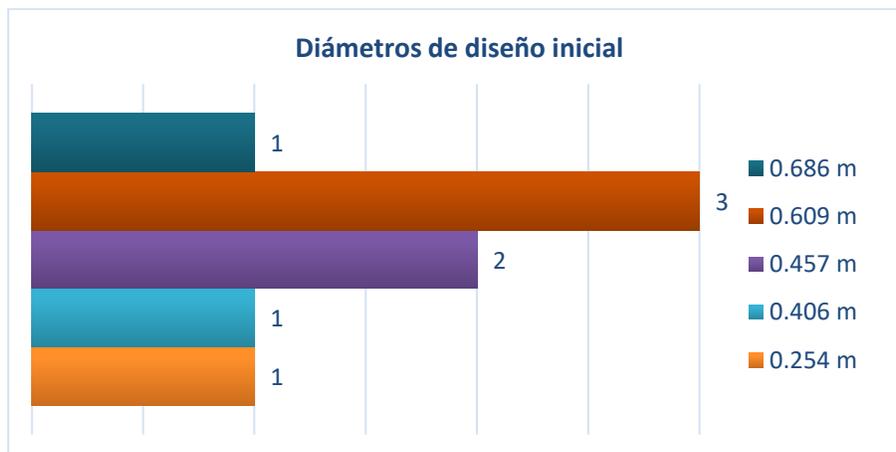
4.9.1 Colector 1 – Red Beltrán

Este colector está compuesto por 8 tuberías y 9 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidencio que en este colector el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 65. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 1 - Red Beltrán

Para el diseño optimizado del colector se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 66. Diámetros internos de diseño inicial Colector 1 - Red Beltrán

Tabla 20. Costos del Colector 1 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones

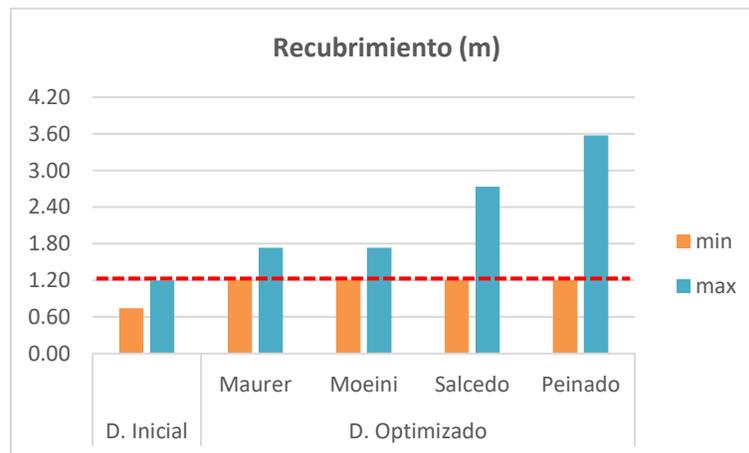
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 282,935	\$ 203,763	72.02
Moeini (IRR)	\$ 42,792	\$ 34,039	79.55
Salcedo (COP)	\$ 102,635,163	\$ 76,503,071	74.54
Peinado (COP)	\$ 104,421,355	\$ 83,907,692	80.35

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

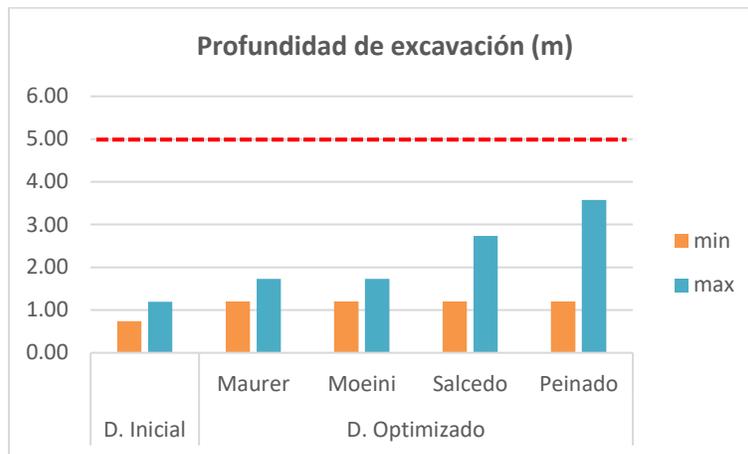
Tabla 21. Parámetros hidráulicos del Colector 1 - Red Beltrán

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	0.74	1.20	1.20	1.20	1.20
	max	1.20	1.73	1.73	2.74	3.57
Profundidad de excavación (m)	min	1.35	1.46	1.46	1.46	1.46
	max	1.48	2.19	2.19	2.99	3.98
Velocidad de diseño (m/s)	min	2.45	2.40	2.40	2.40	1.13
	max	6.12	7.04	7.04	7.04	7.27
Relación de llenado (%)	min	23%	25%	25%	25%	51%
	max	77%	86%	86%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	25.32	14.38	14.38	14.38	3.21
	max	134.98	116.66	116.66	116.66	126.14

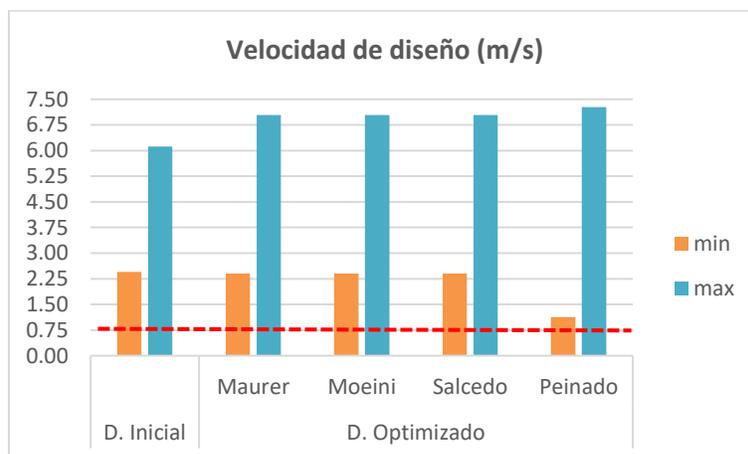
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



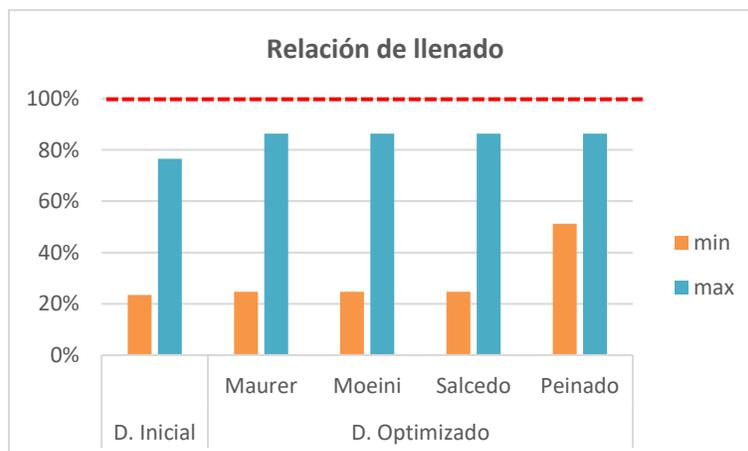
Gráfica 67. Valores del recubrimiento del Colector 1 - Red Beltrán



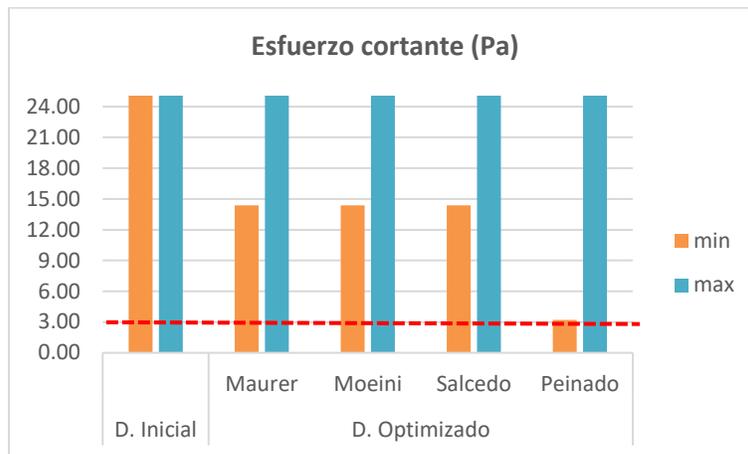
Gráfica 68. Valores de la profundidad de excavación del Colector 1 - Red Beltrán



Gráfica 69. Valores de la velocidad de diseño del Colector 1 - Red Beltrán



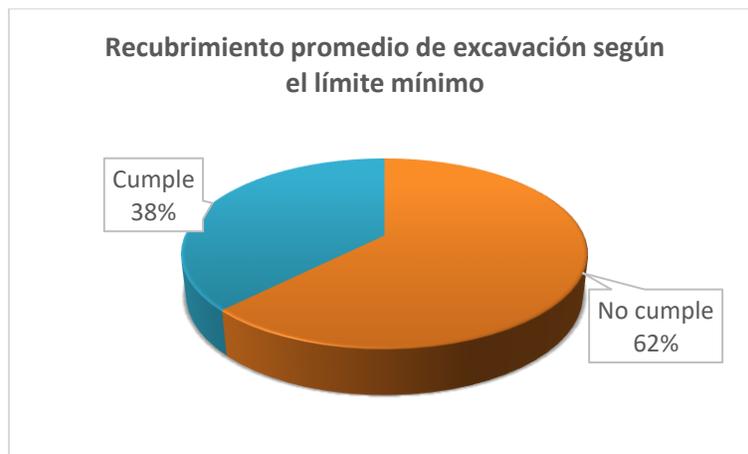
Gráfica 70. Valores de la relación de llenado del Colector 1 - Red Beltrán



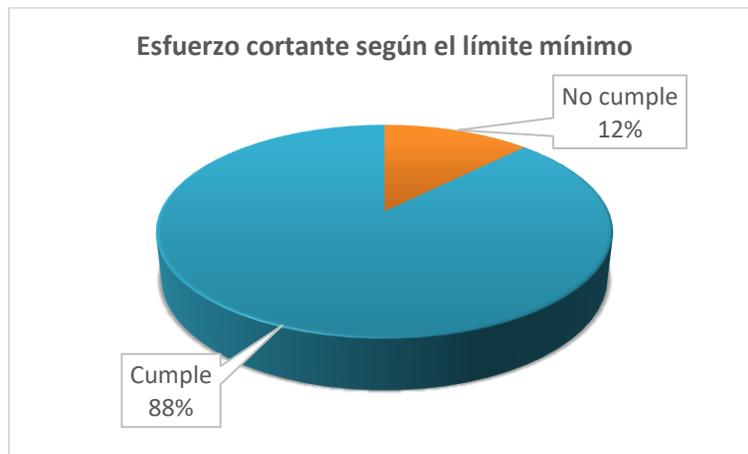
Gráfica 71. Valores del esfuerzo cortante del Colector 1 - Red Beltrán

4.9.2 Colector 2 – Red Beltrán

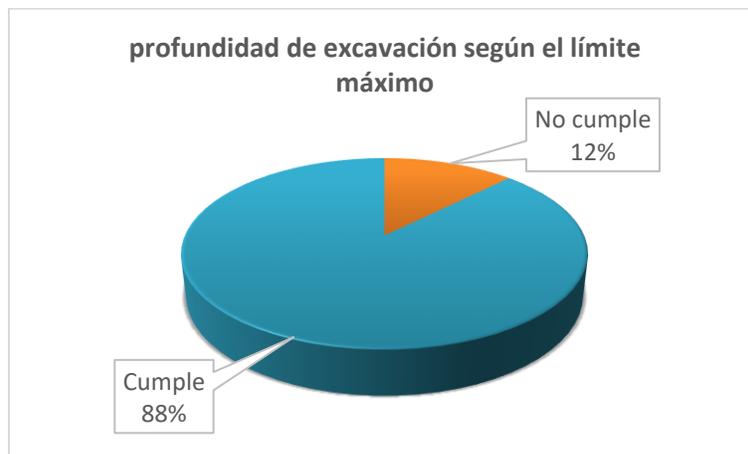
Este colector está compuesto por 8 tuberías y 9 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidencio que se incumple con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) el recubrimiento y el esfuerzo cortante con respecto al límite inferior y la profundidad de excavación con el límite superior.



Gráfica 72. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Beltrán



Gráfica 73. Esfuerzo cortante del diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Beltrán



Gráfica 74. Profundidad de excavación según el límite máximo. Colector 2 - Red Beltrán

Para el diseño optimizado del colector se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 75. Diámetros internos de diseño inicial Colector 2 - Red Beltrán

Tabla 22. Costos del Colector 2 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 416,535	\$ 336,482	80.78
Moeini (IRR)	\$ 71,713	\$ 64,340	89.72
Salcedo (COP)	\$ 175,563,496	\$ 153,124,799	87.22
Peinado (COP)	\$ 152,116,796	\$ 136,266,758	89.58

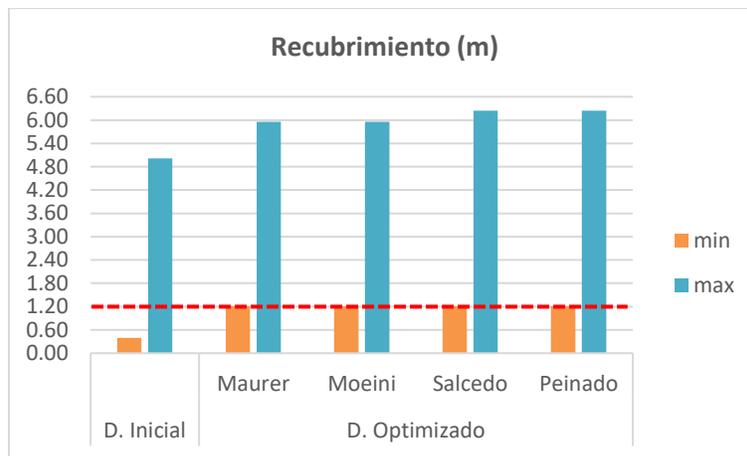
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente. Cabe resaltar que estableciendo como profundidad de excavación máxima permitida 5 m, que es lo que establece la normativa, no se logró obtener una solución por lo que se amplió este límite hasta obtener una solución en el diseño hidráulico de la red.

Tabla 23. Parámetros hidráulicos del Colector 2 - Red Beltrán

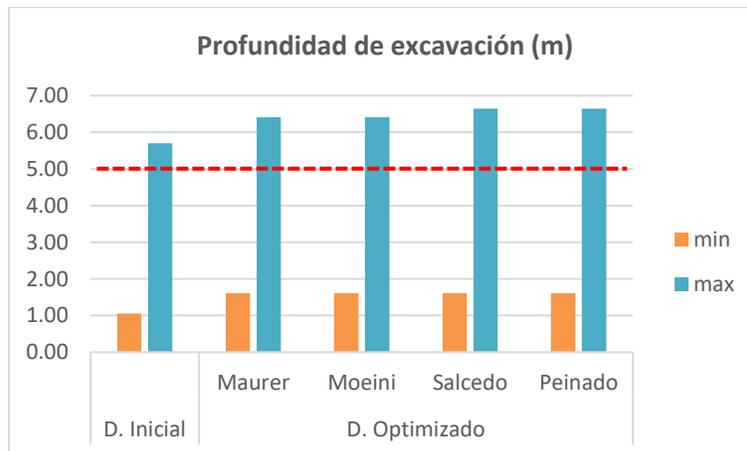
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	0.39	1.20	1.20	1.20	1.20
	max	5.01	5.95	5.95	6.24	6.24
Profundidad de excavación	min	1.05	1.61	1.61	1.61	1.61
	max	5.70	6.41	6.41	6.65	6.65
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.92	1.49	1.49	1.74	1.88
	max	4.90	5.70	5.70	5.15	7.77
Relación de llenado (%)	min	35%	48%	48%	52%	49%
	max	95%	86%	86%	86%	86%

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	2.52	5.10	5.10	7.19	8.41
	max	75.53	70.05	70.05	61.50	138.71

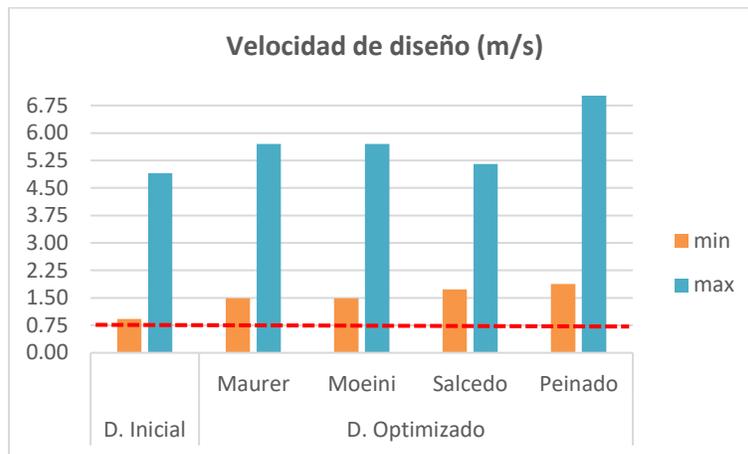
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



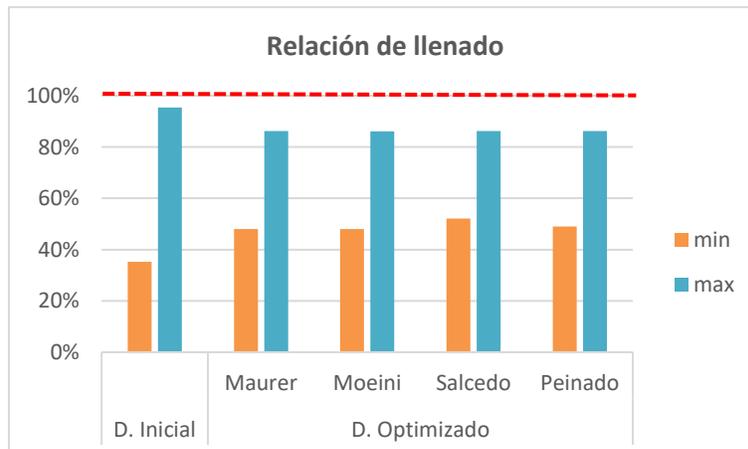
Gráfica 76. Valores del recubrimiento del Colector 2 - Red Beltrán



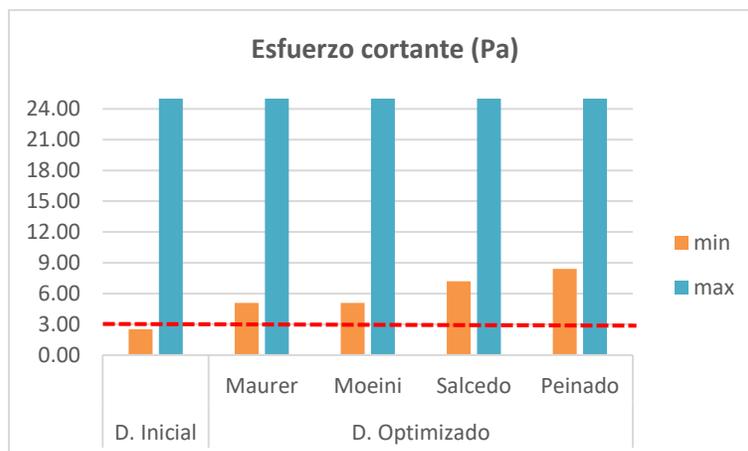
Gráfica 77. Valores de la profundidad de excavación del Colector 2 - Red Beltrán



Gráfica 78. Valores de la velocidad de diseño del Colector 2 - Red Beltrán



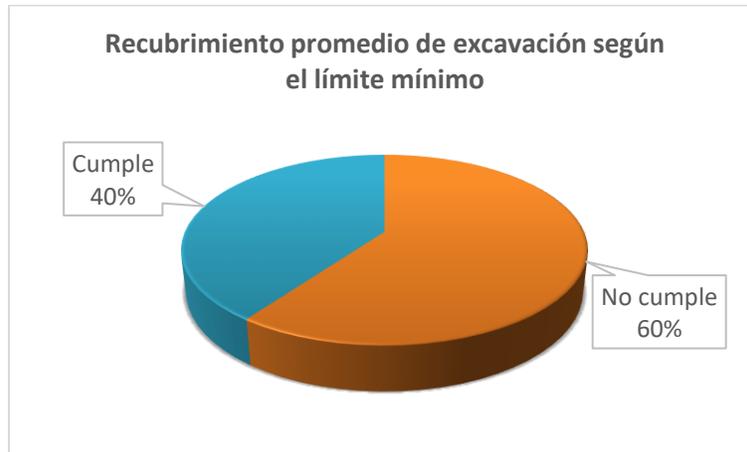
Gráfica 79. Valores de la relación de llenado del Colector 2 - Red Beltrán



Gráfica 80. Valores del esfuerzo cortante del Colector 2 - Red Beltrán

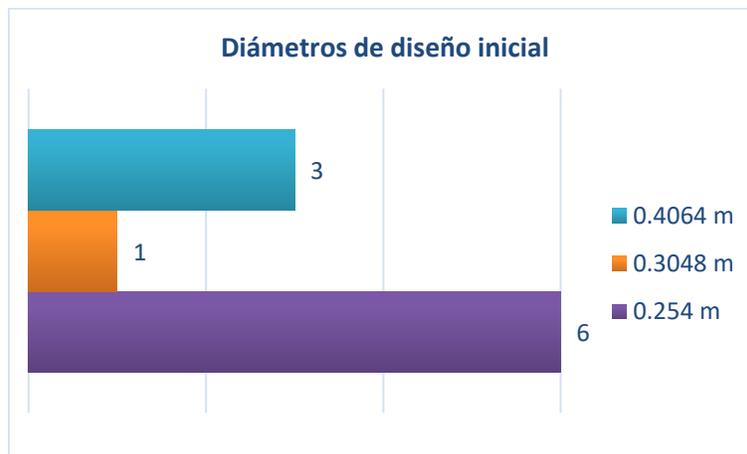
4.9.3 Colector 3 – Red Beltrán

Este tramo está compuesto por 10 tuberías y 11 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidenció que en este tramo el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 81. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 3 - Red Beltrán

Para el diseño optimizado del colector se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 82. Diámetros internos de diseño inicial Colector 3 - Red Beltrán

Tabla 24. Costos del Colector 3 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones

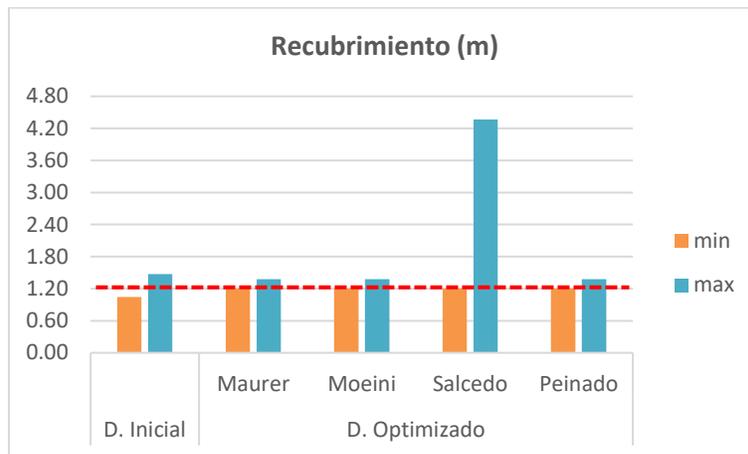
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 319,203	\$ 258,933	81.12
Moeini (IRR)	\$ 52,606	\$ 46,210	87.84
Salcedo (IRR)	\$ 97,138,090	\$ 90,902,960	93.58
Peinado (COP)	\$ 95,732,755	\$ 89,877,886	93.88

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

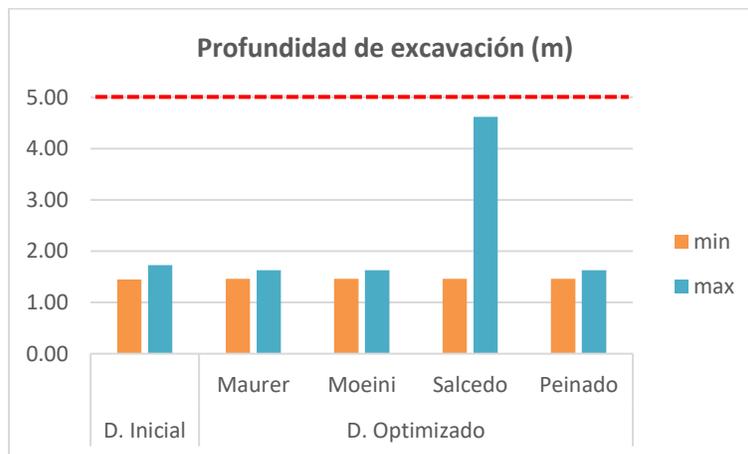
Tabla 25. Parámetros hidráulicos del Colector 3 - Red Beltrán

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46
	<i>max</i>	1.73	1.63	1.63	4.62	1.63
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	1.04	1.20	1.20	1.20	1.20
	<i>max</i>	1.48	1.38	1.38	4.366	1.376
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	1.17	1.39	1.39	0.99	1.39
	<i>max</i>	3.87	4.52	4.52	4.52	4.52
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	15%	26%	26%	42%	26%
	<i>max</i>	84%	84%	84%	84%	84%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	7.02	6.38	6.38	3.02	6.38
	<i>max</i>	53.97	50.83	50.83	50.68	50.83

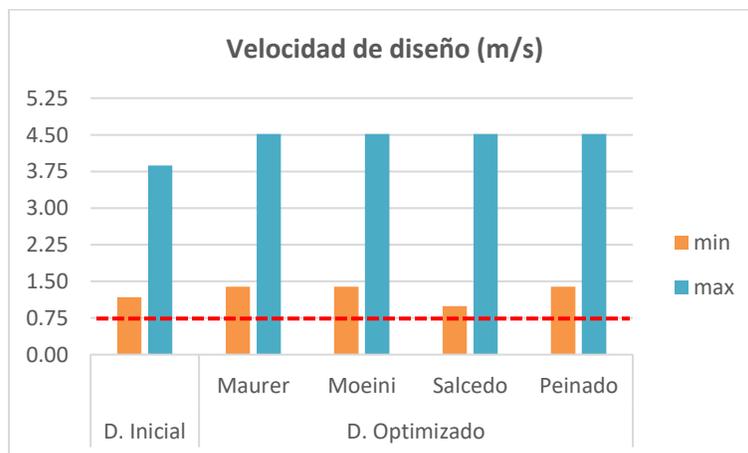
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



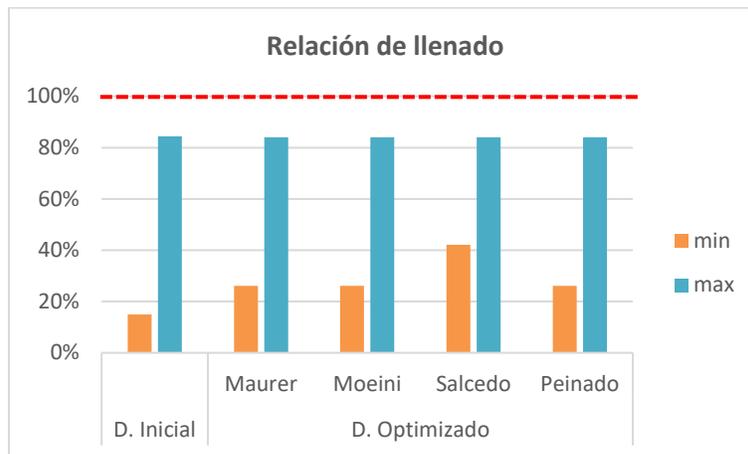
Gráfica 83. Valores del recubrimiento del Colector 3 - Red Beltrán



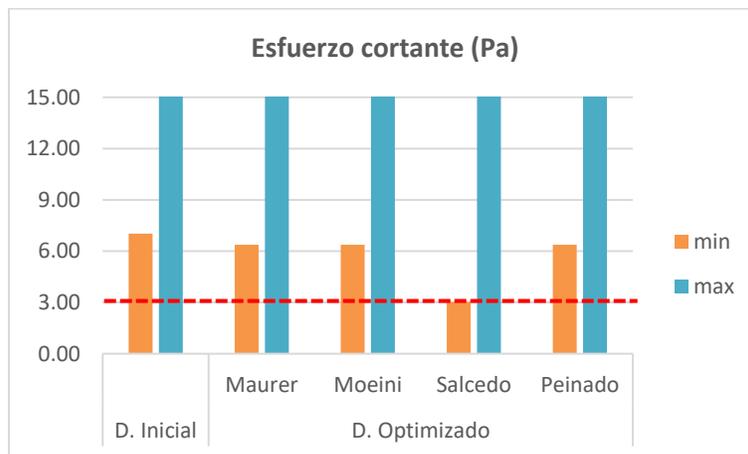
Gráfica 84. Valores de la profundidad de excavación del Colector 3 - Red Beltrán



Gráfica 85. Valores de la velocidad de diseño del Colector 3 - Red Beltrán



Gráfica 86. Valores de la relación de llenado del Colector 3 - Red Beltrán

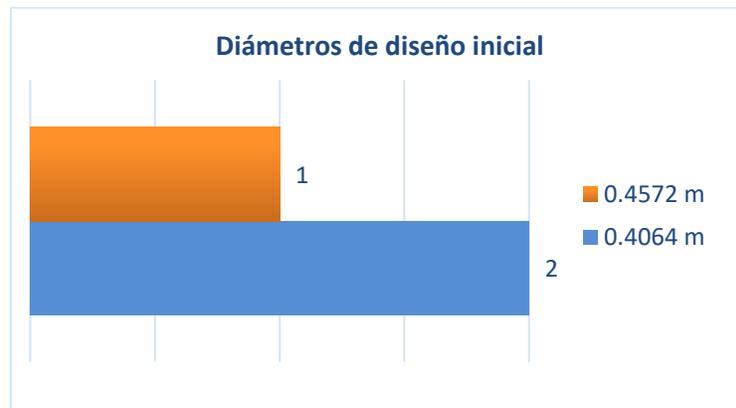


Gráfica 87. Valores del esfuerzo cortante del Colector 3 - Red Beltrán

4.9.4 Colector 4 – Red Beltrán

Este tramo está compuesto por 3 tuberías y 4 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidenció que se cumplen con todos los límites establecidos por la norma excepto el recubrimiento mínimo, todas las tuberías están instaladas a una profundidad menor a 1.2 m.

Para el diseño optimizado del colector se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 88. Diámetros internos de diseño inicial Colector 4 - Red Beltrán

Tabla 26. Costos del Colector 4 - Red Beltrán con las diferentes ecuaciones

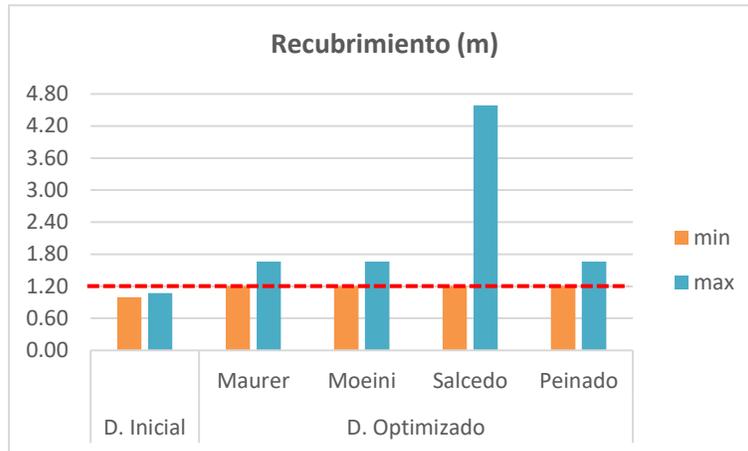
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 168,255	\$ 139,724	83.04
Moeini (IRR)	\$ 24,947	\$ 22,466	90.06
Salcedo (COP)	\$ 67,271,115	\$ 66,736,389	99.21
Peinado (COP)	\$ 53,301,425	\$ 51,137,722	95.94

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

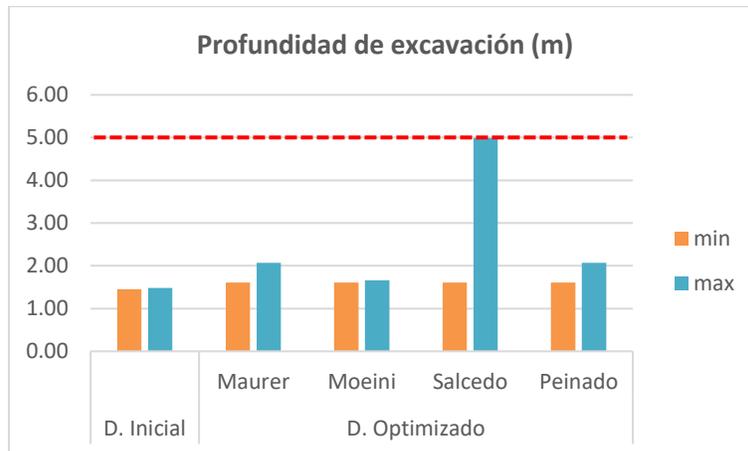
Tabla 27. Parámetros hidráulicos del Colector 4 - Red Beltrán

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.45	1.61	1.61	1.61	1.61
	<i>max</i>	1.48	2.07	1.66	4.99	2.07
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.99	1.20	1.20	1.20	1.20
	<i>max</i>	1.07	1.66	1.66	4.58	1.66
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	3.50	4.35	3.99	2.21	4.35
	<i>max</i>	4.63	5.40	5.40	5.40	5.40
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	43%	46%	46%	50%	46%
	<i>max</i>	100%	86%	77%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	34.57	48.96	36.59	11.68	48.96
	<i>max</i>	78.83	74.20	74.20	74.20	74.20

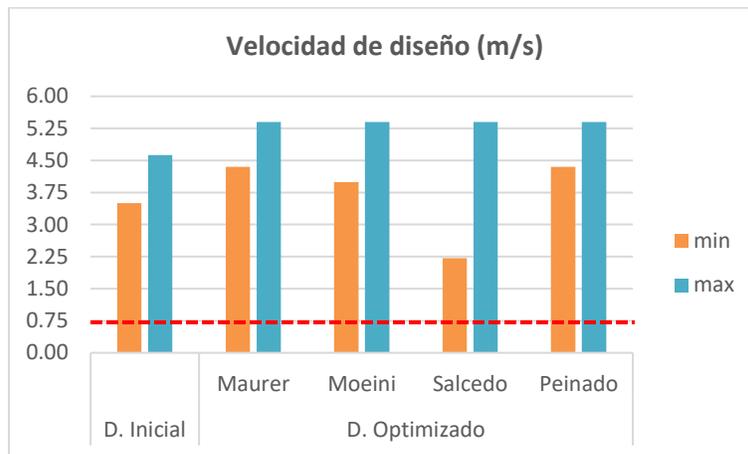
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



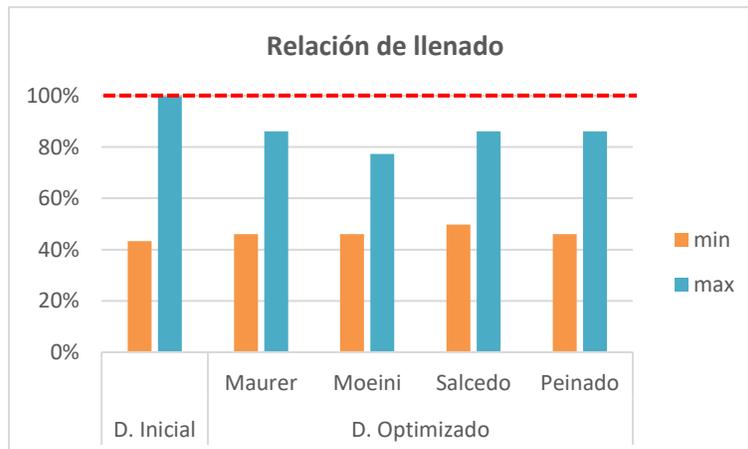
Gráfica 89. Valores del recubrimiento del Colector 4 - Red Beltrán



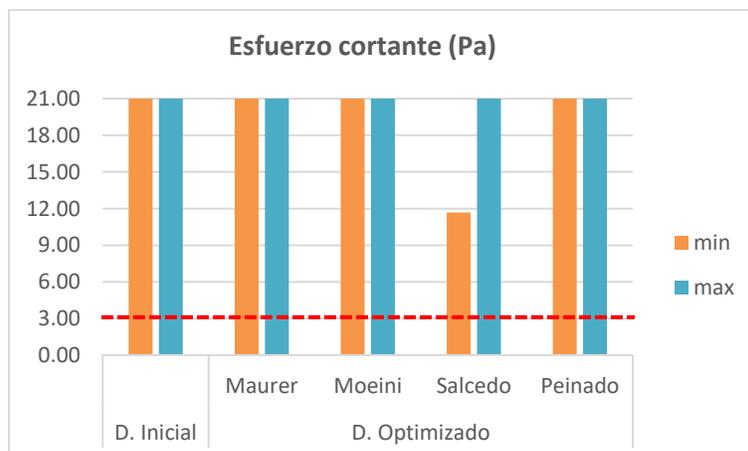
Gráfica 90. Valores de la profundidad de excavación del Colector 4 - Red Beltrán



Gráfica 91. Valores de la velocidad de diseño del Colector 4 - Red Beltrán



Gráfica 92. Valores de la relación de llenado del Colector 4 - Red Beltrán



Gráfica 93. Valores del esfuerzo cortante del Colector 4 - Red Beltrán

Teniendo los resultados de todos los colectores es posible calcular los costos con las ecuaciones correspondientes de toda la red.

Tabla 28. Costos de la red Beltrán con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 1,186,927	\$ 938,903	79.10
Moeini (IRR)	\$ 192,058	\$ 167,055	86.98
Salcedo (COP)	\$ 442,607,864	\$ 387,267,220	87.50
Peinado (COP)	\$ 405,572,331	\$ 361,190,057	89.06

4.10 Red Soacha

Esta es una red pluvial de 8 colectores con descargas independientes. Fue diseñada con la ecuación de Manning ($n=0.011$), en totalidad la red se compone de 77 tuberías y 84 nodos incluyendo las 8 descargas

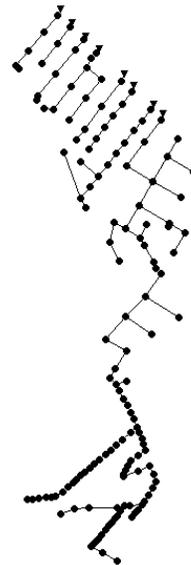
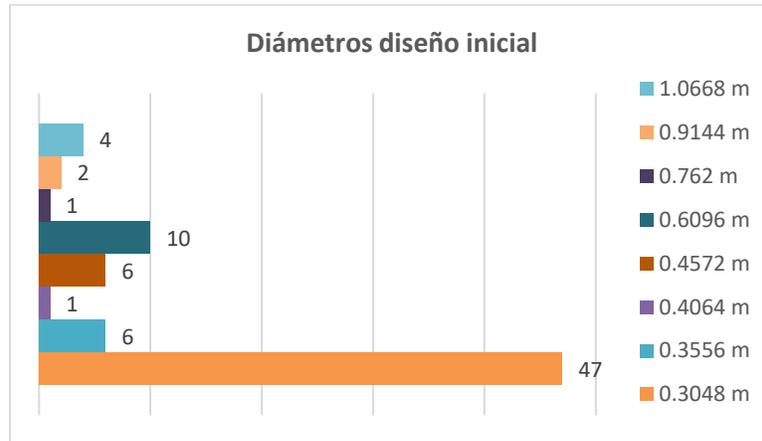


Ilustración 13. Topología de la red Soacha

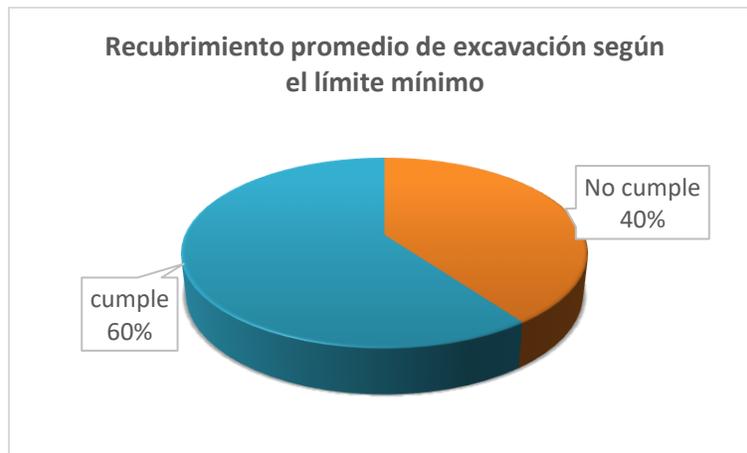
Para realizar la optimización de la red y las debidas verificaciones es necesario individualizar los colectores que conforman la red, además se toman la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial del proyecto.



Gráfica 94. Diámetros internos de diseño inicial red Soacha

4.10.1 Colector 1 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 5 tuberías y 6 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 95. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 1 - Red Soacha

Tabla 29. Costos del Colector 1 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 98,668	\$ 86,308	87.47
Moeini (IRR)	\$ 17,254	\$ 15,963	92.52

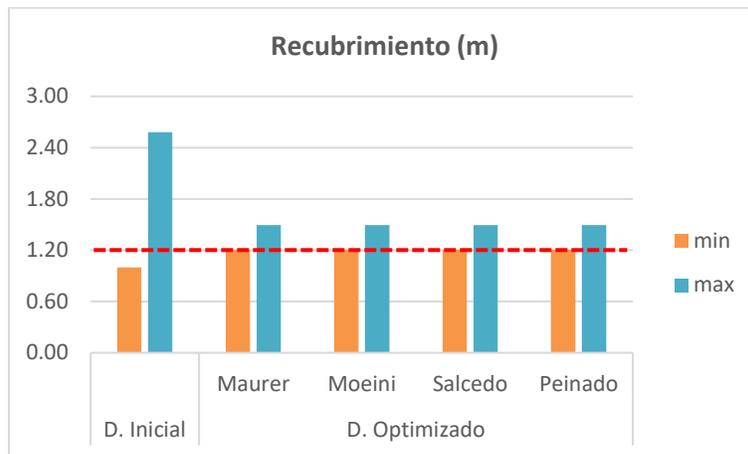
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Salcedo (COP)	\$ 35,635,562	\$ 26,143,295	73.36
Peinado (COP)	\$ 35,804,614	\$ 34,330,022	95.88

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

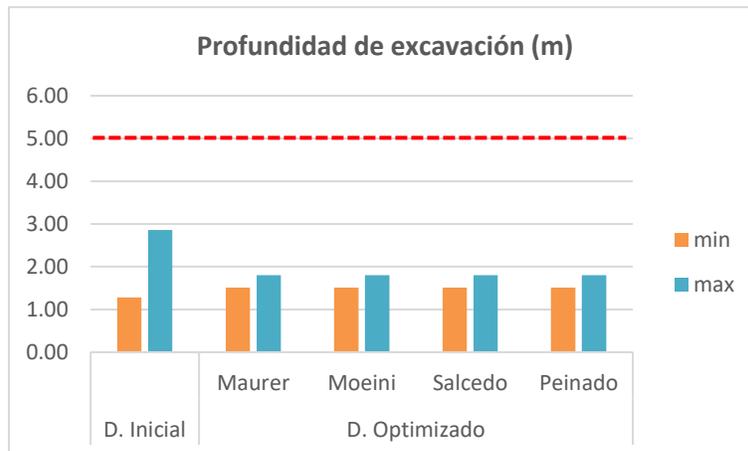
Tabla 30. Parámetros hidráulicos del Colector 1- Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	2.58	1.50	1.50	1.50	1.50
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	<i>max</i>	2.86	1.80	1.80	1.80	1.80
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.97	0.95	0.95	0.95	0.95
	<i>max</i>	1.52	1.36	1.36	1.36	1.36
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	11%	23%	23%	23%	23%
	<i>max</i>	66%	79%	79%	79%	79%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	4.28	3.03	3.03	3.03	3.03
	<i>max</i>	7.30	5.76	5.76	5.76	5.76

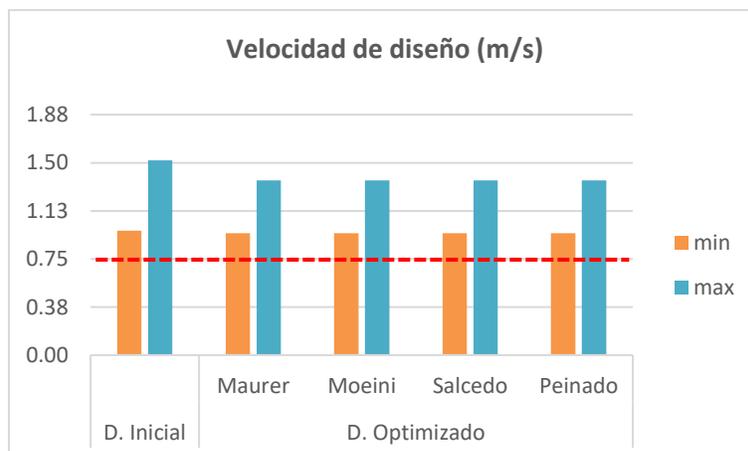
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



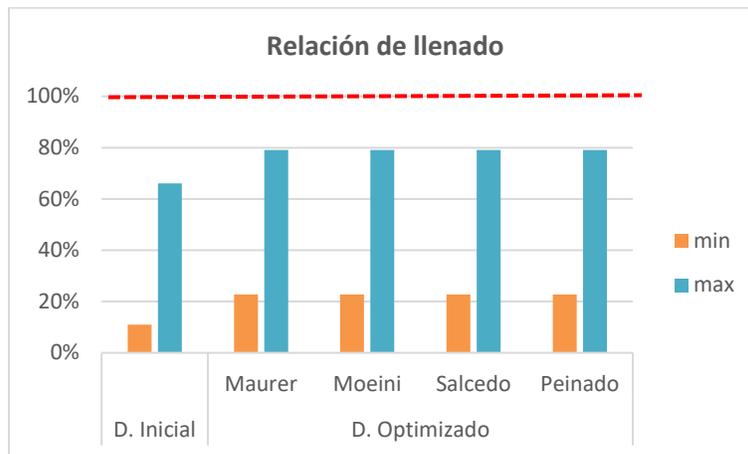
Gráfica 96. Valores del recubrimiento del Colector 1 - Red Soacha



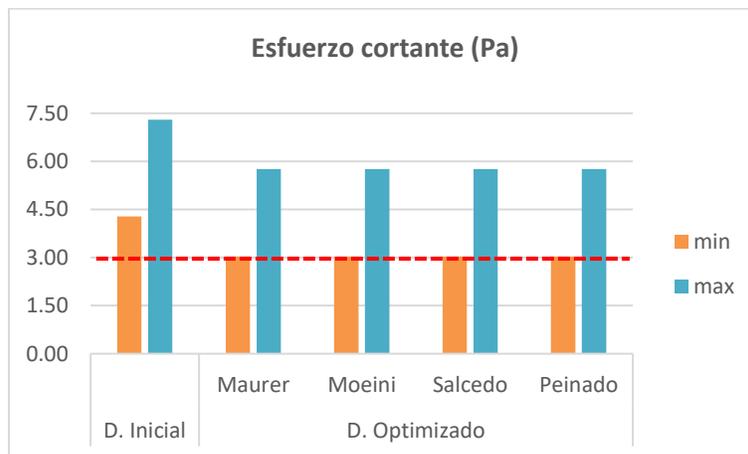
Gráfica 97. Valores de la profundidad de excavación del Colector 1 - Red Soacha



Gráfica 98. Valores de la velocidad de diseño del Colector 1 - Red Soacha



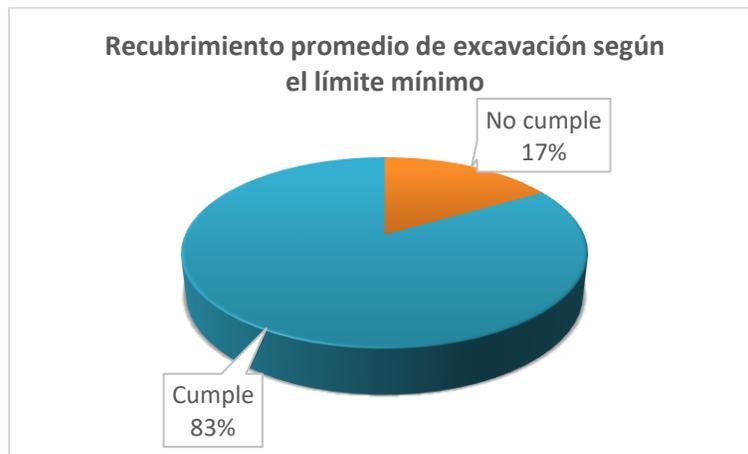
Gráfica 99. Valores de la relación de llenado del Colector 1 - Red Soacha



Gráfica 100. Valores del esfuerzo cortante del Colector 1 - Red Soacha

4.10.2 Colector 2 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 3 tuberías y 4 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 101. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 2 - Red Soacha

Tabla 31. Costos del Colector 2 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

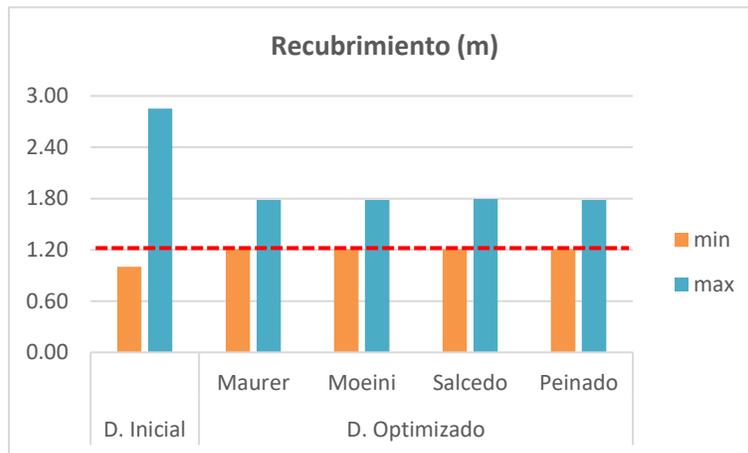
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 68,448	\$ 62,389	91.15
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 12,697	\$ 12,364	97.38
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 28,054,674	\$ 27,705,445	98.76
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 24,957,653	\$ 23,825,829	95.47

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

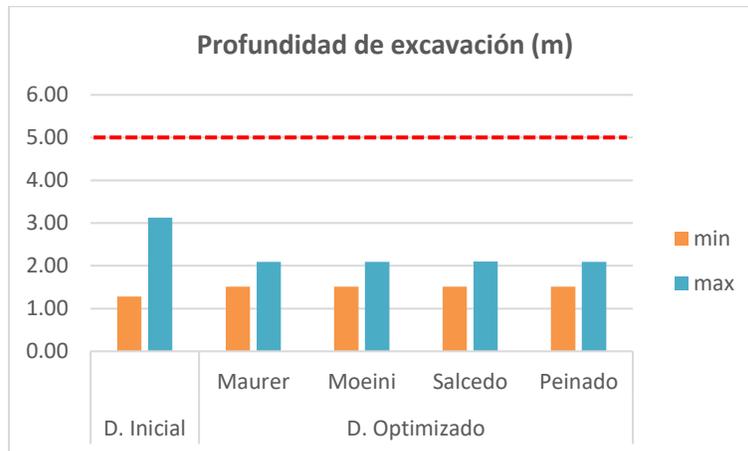
Tabla 32. Parámetros hidráulicos del Colector 2- Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	2.85	1.79	1.79	1.80	1.79
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	<i>max</i>	3.13	2.09	2.09	2.10	2.09
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.93	0.97	0.97	0.97	0.97
	<i>max</i>	1.34	1.16	1.16	1.16	1.16
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	20%	30%	30%	30%	30%
	<i>max</i>	77%	66%	66%	66%	66%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	3.62	3.01	3.01	3.01	3.01
	<i>max</i>	6.68	3.58	3.58	3.58	3.58

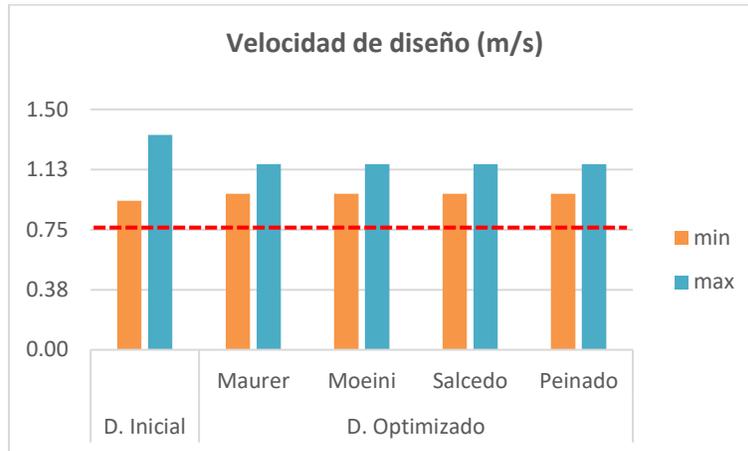
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



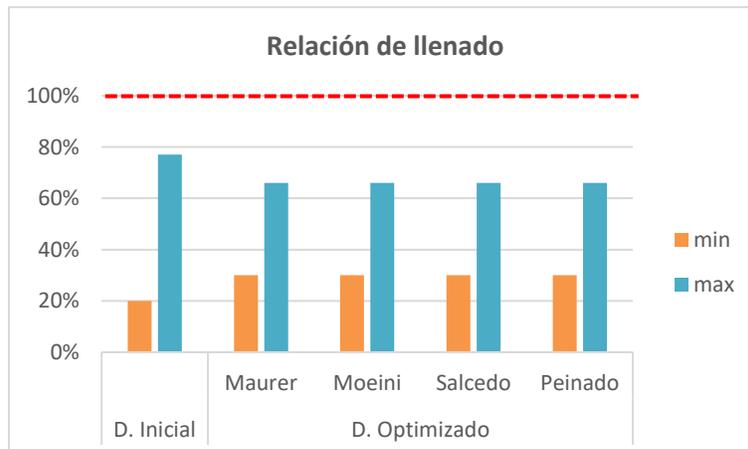
Gráfica 102. Valores del recubrimiento del Colector 2 - Red Soacha



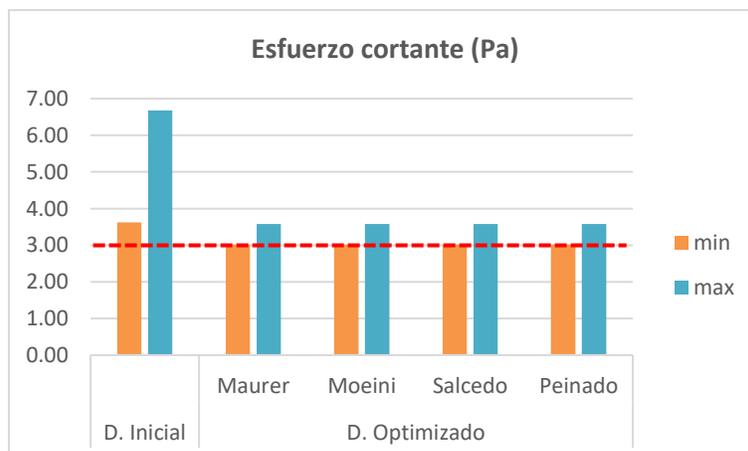
Gráfica 103. Valores de la profundidad de excavación del Colector 2 - Red Soacha



Gráfica 104. Valores de la velocidad de diseño del Colector 2 - Red Soacha



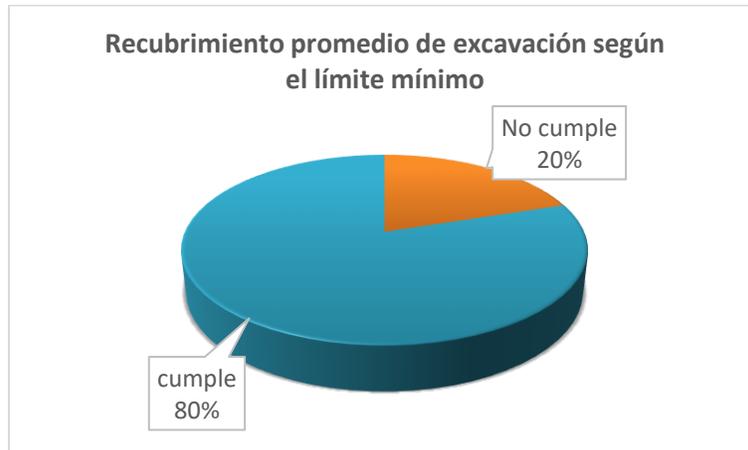
Gráfica 105. Valores de la relación de llenado del Colector 2 - Red Soacha



Gráfica 106. Valores del esfuerzo cortante del Colector 2 - Red Soacha

4.10.3 Colector 3 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 5 tuberías y 6 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 107. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 3 - Red Soacha

Tabla 33. Costos del Colector 3 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 111,154	\$ 88,843	79.93
Moeini (IRR)	\$ 20,017	\$ 16,944	84.65
Salcedo (COP)	\$ 45,492,642	\$ 33,351,002	73.31
Peinado (COP)	\$ 39,350,637	\$ 35,780,021	90.93

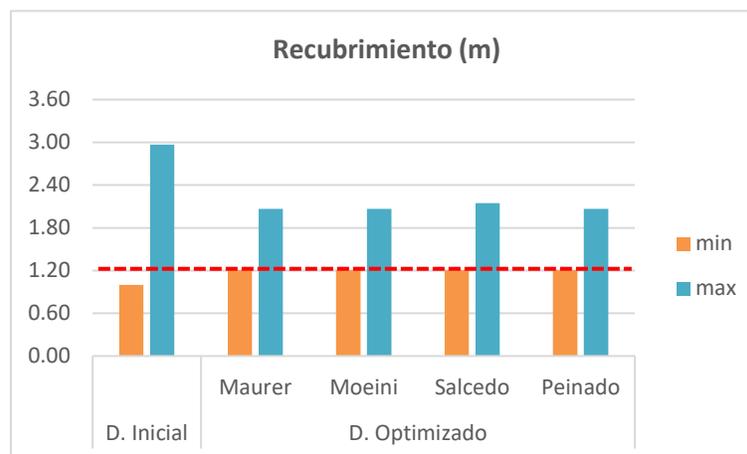
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

Tabla 34. Parámetros hidráulicos del Colector 3- Red Soacha

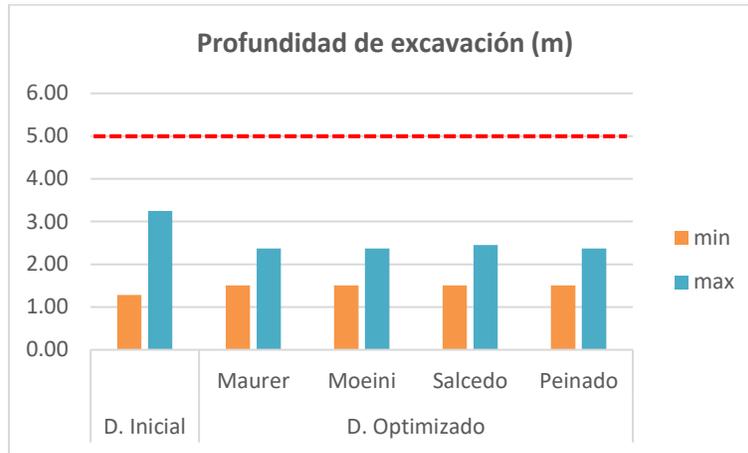
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	max	2.97	2.07	2.07	2.15	2.07
	min	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Profundidad de excavación (m)	max	3.25	2.37	2.37	2.45	2.37
Velocidad de diseño (m/s)	min	1.28	1.04	1.04	1.04	1.04
	max	1.87	2.48	2.48	2.30	2.48
Relación de llenado (%)	min	2%	9%	9%	10%	9%
	max	71%	85%	85%	85%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	6.21	3.02	3.02	3.02	3.02
	max	19.01	27.82	27.82	23.47	27.82

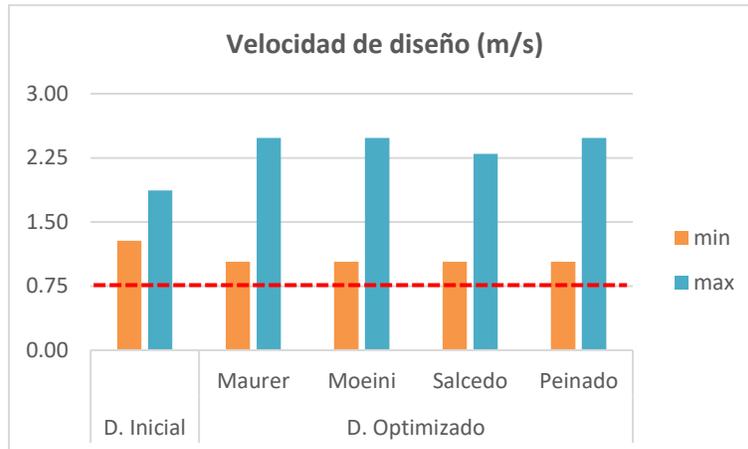
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



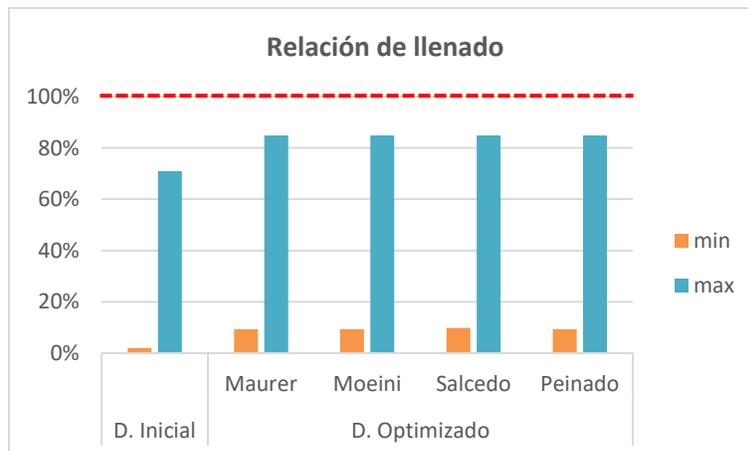
Gráfica 108. Valores del recubrimiento del Colector 3 - Red Soacha



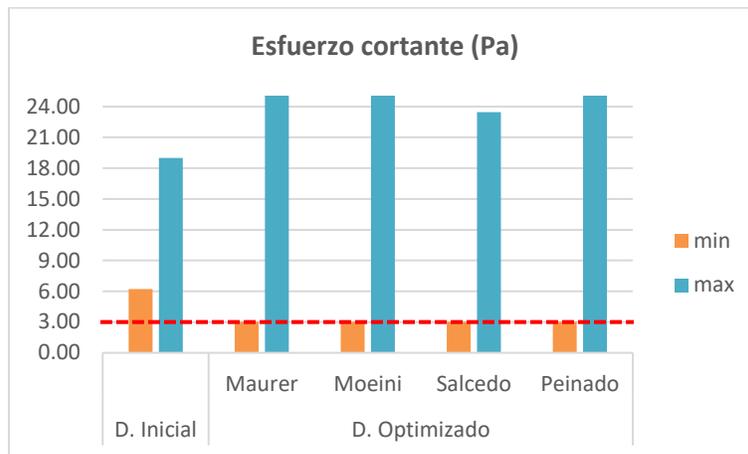
Gráfica 109. Valores de la profundidad de excavación del Colector 3 - Red Soacha



Gráfica 110. Valores de la velocidad de diseño del Colector 3 - Red Soacha



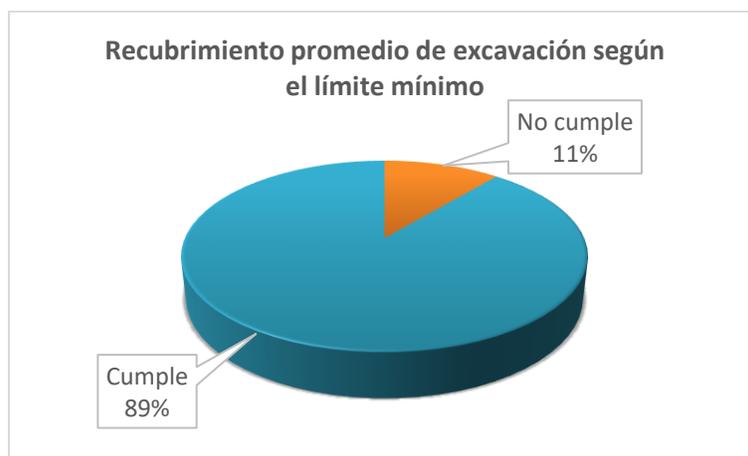
Gráfica 111. Valores de la relación de llenado del Colector 3 - Red Soacha



Gráfica 112. Valores del esfuerzo cortante del Colector 3 - Red Soacha

4.10.4 Colector 4 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 9 tuberías y 10 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 113. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 4 - Red Soacha

Tabla 35. Costos del Colector 4 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 219,281	\$ 193,182	88.10
Moeini (IRR)	\$ 39,587	\$ 37,904	95.75

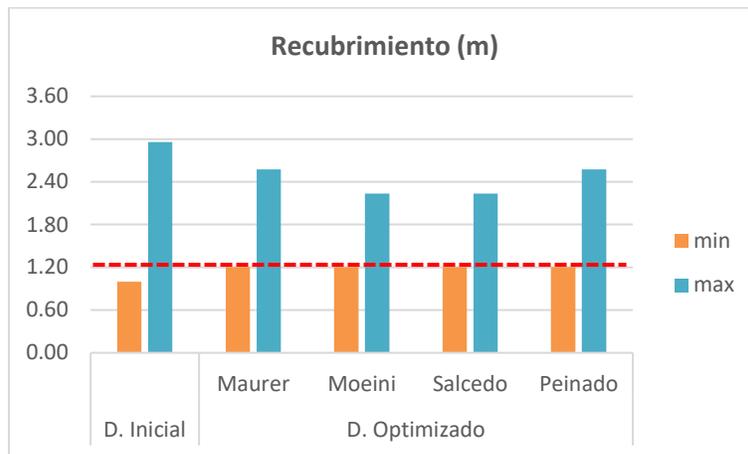
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Salcedo (COP)	\$ 80,843,170	\$ 85,583,334	105.86
Peinado (COP)	\$ 72,609,744	\$ 69,019,408	95.06

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

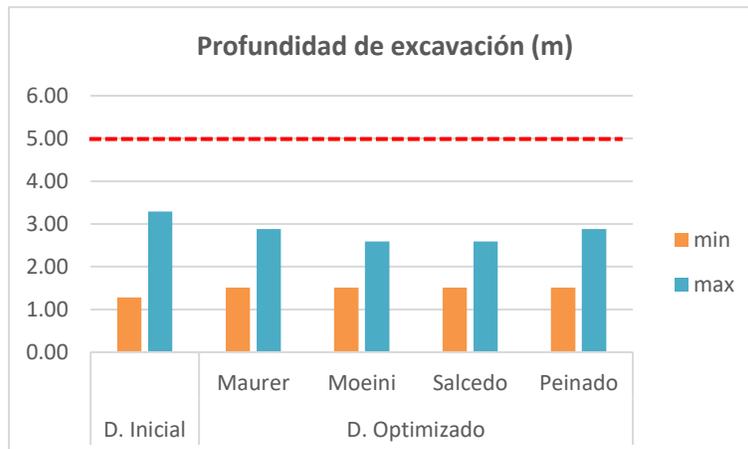
Tabla 36. Parámetros hidráulicos del Colector 4- Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	2.96	2.58	2.23	2.23	2.58
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	<i>max</i>	3.29	2.88	2.59	2.59	2.88
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93
	<i>max</i>	2.41	2.96	2.96	2.61	2.96
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	5%	13%	13%	14%	13%
	<i>max</i>	100%	84%	86%	86%	84%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	3.33	3.01	3.01	3.01	3.01
	<i>max</i>	28.91	35.98	35.98	27.20	35.98

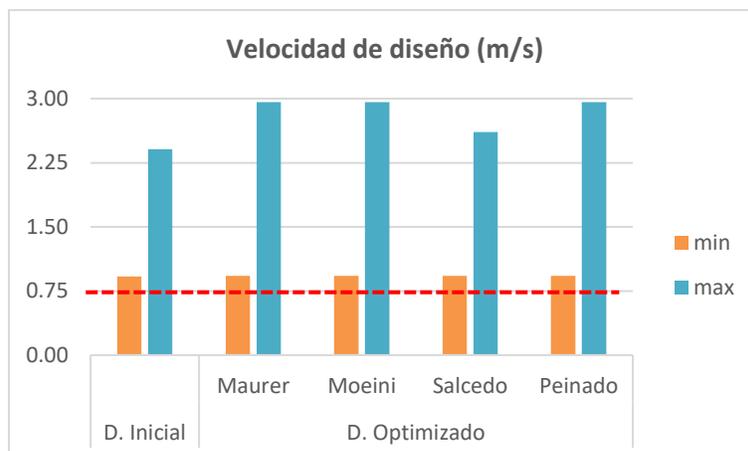
En las siguientes gráficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



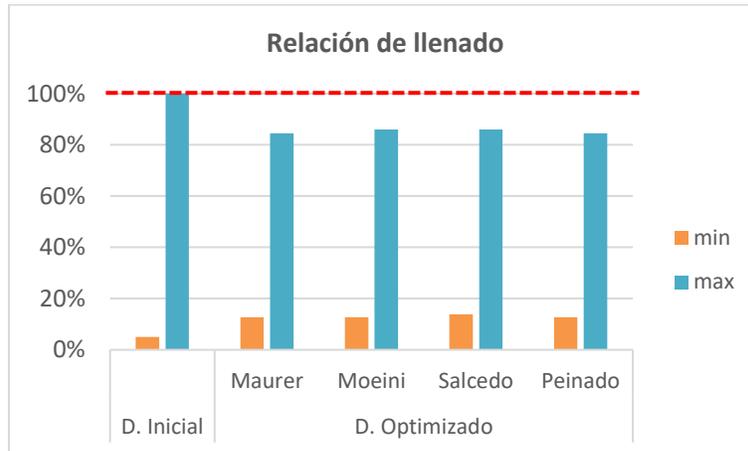
Gráfica 114. Valores del recubrimiento del Colector 4 - Red Soacha



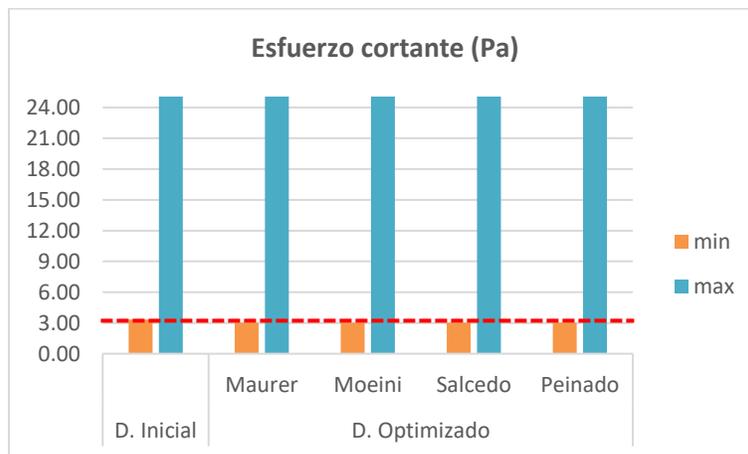
Gráfica 115. Valores de la profundidad de excavación del Colector 4 - Red Soacha



Gráfica 116. Valores de la velocidad de diseño del Colector 4 - Red Soacha



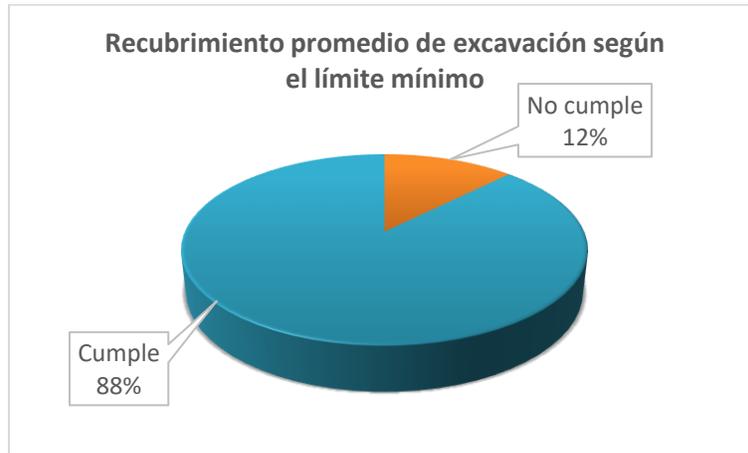
Gráfica 117. Valores de la relación de llenado del Colector 4 - Red Soacha



Gráfica 118. Valores del esfuerzo cortante del Colector 4 - Red Soacha

4.10.5 Colector 5 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 4 tuberías y 5 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 119. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 5 - Red Soacha

Tabla 37. Costos del Colector 5 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

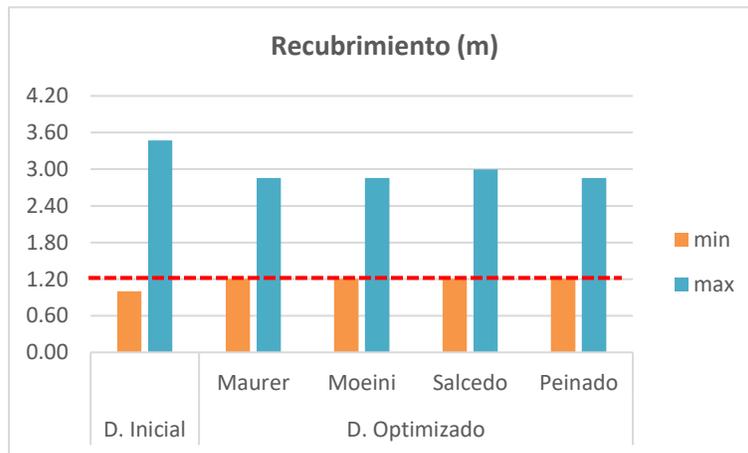
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 118,962	\$ 109,404	91.97
Moeini (IRR)	\$ 23,575	\$ 23,362	99.10
Salcedo (COP)	\$ 53,467,517	\$ 51,607,177	96.52
Peinado (COP)	\$ 38,622,734	\$ 37,504,752	97.11

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

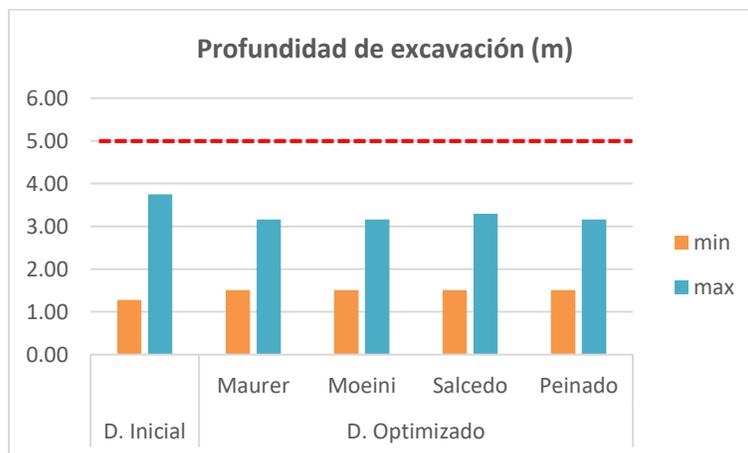
Tabla 38. Parámetros hidráulicos del Colector 5 - Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	max	3.47	2.86	2.86	3.00	2.86
Profundidad de excavación (m)	min	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	max	3.75	3.16	3.16	3.30	3.16
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.82	0.88	0.88	0.95	0.88
	max	1.33	1.18	1.18	1.18	1.18
Relación de llenado (%)	min	6%	15%	15%	15%	15%
	max	97%	86%	86%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	3.31	3.00	3.00	3.02	3.00
	max	4.62	3.65	3.65	3.65	3.65

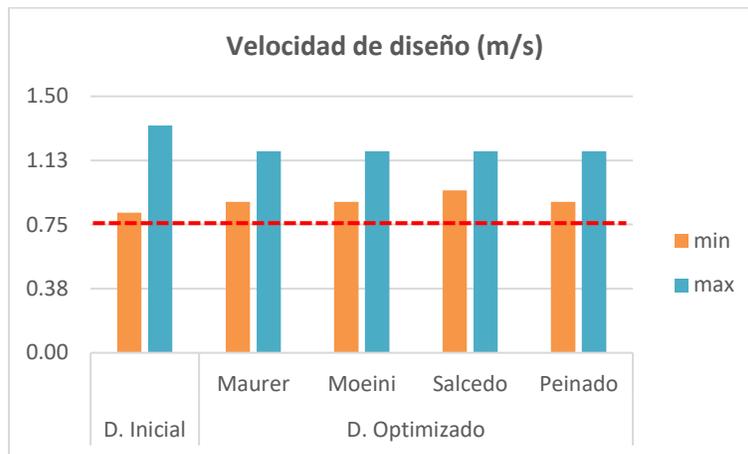
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



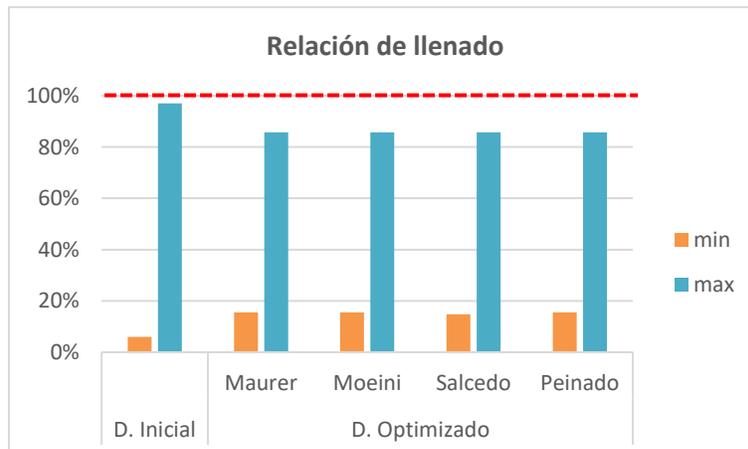
Gráfica 120. Valores del recubrimiento del Colector 5 - Red Soacha



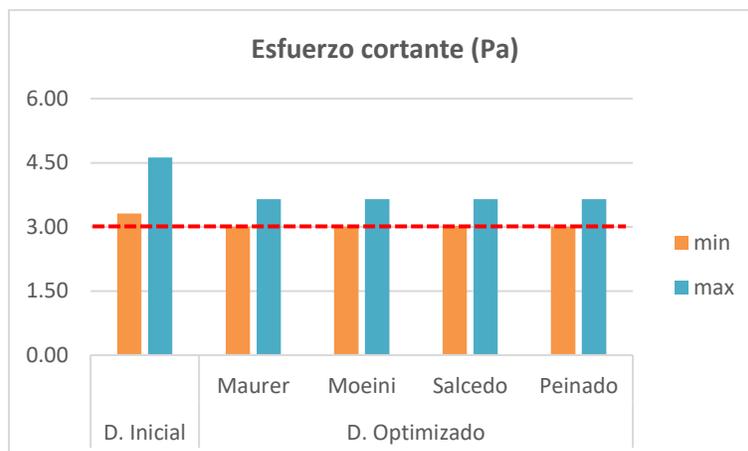
Gráfica 121. Valores de la profundidad de excavación del Colector 5 - Red Soacha



Gráfica 122. Valores de la velocidad de diseño del Colector 5 - Red Soacha



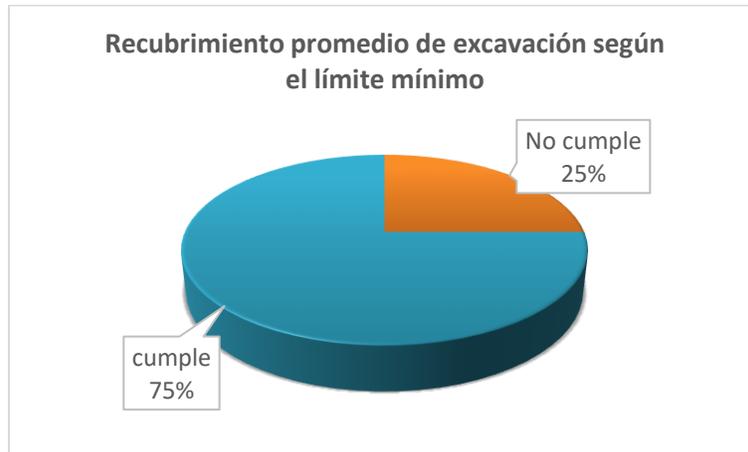
Gráfica 123. Valores de la relación de llenado del Colector 5 - Red Soacha



Gráfica 124. Valores del esfuerzo cortante del Colector 5 - Red Soacha

4.10.6 Colector 6 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 6 tuberías y 7 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 125. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 6 - Red Soacha

Tabla 39. Costos del Colector 6 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 113,119	\$ 101,654	89.86
Moeini (IRR)	\$ 21,469	\$ 20,663	96.25
Salcedo (COP)	\$ 50,984,638	\$ 47,861,190	93.87
Peinado (COP)	\$ 42,388,829	\$ 40,717,496	96.06

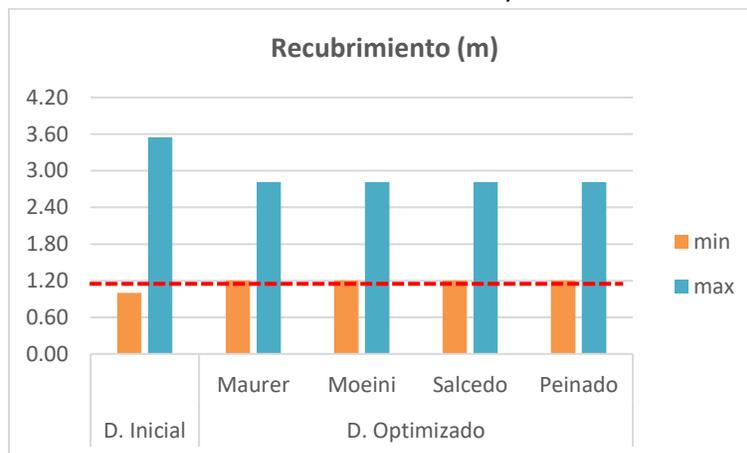
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

Tabla 40. Parámetros hidráulicos del Colector 6 - Red Soacha

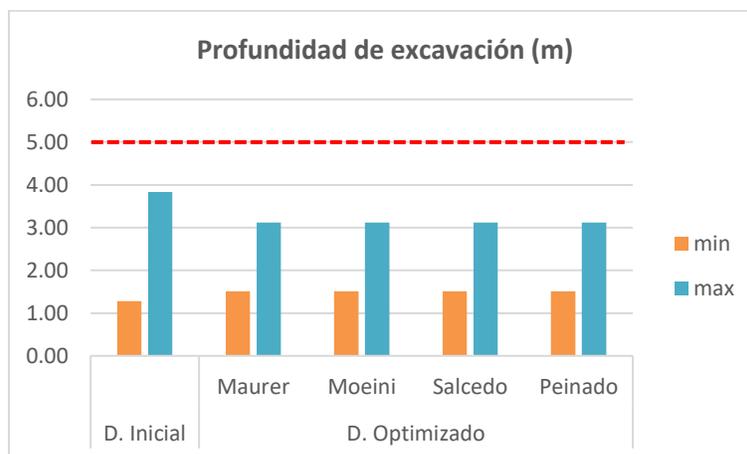
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	max	3.55	2.82	2.82	2.82	2.82
Profundidad de excavación (m)	min	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	max	3.83	3.12	3.12	3.12	3.12

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.97	1.04	1.04	1.04	1.04
	max	1.88	1.70	1.70	1.70	1.70
Relación de llenado (%)	min	19%	32%	32%	32%	32%
	max	97%	86%	86%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	3.11	3.20	3.20	3.20	3.20
	max	9.32	7.59	7.59	7.59	7.59

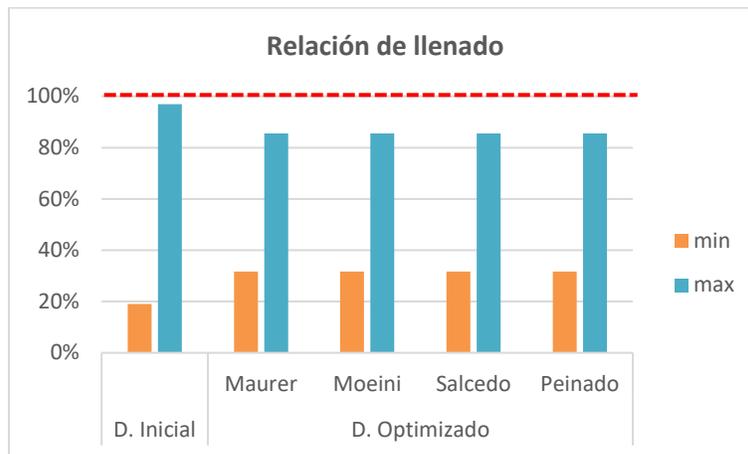
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



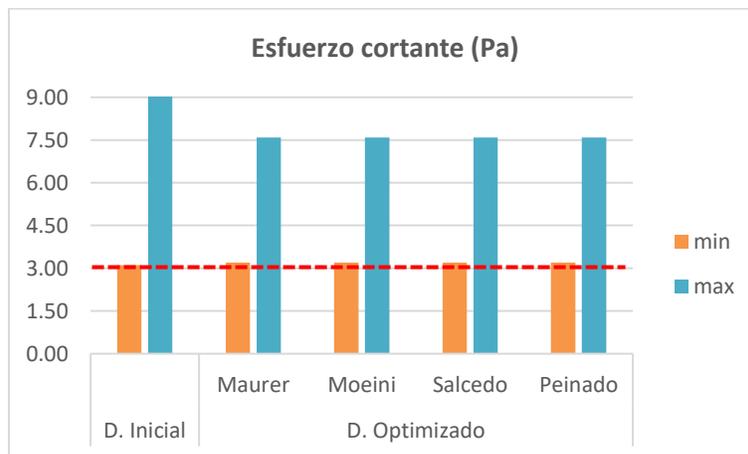
Gráfica 126. Valores del recubrimiento del Colector 6 - Red Soacha



Gráfica 127. Valores de la profundidad de excavación del Colector 6 - Red Soacha



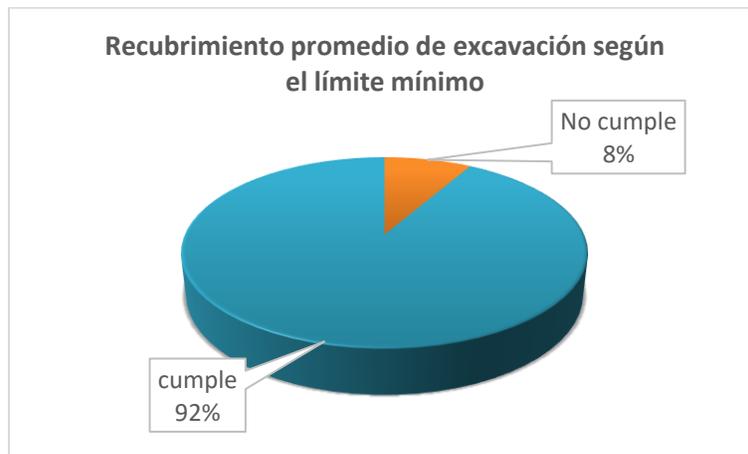
Gráfica 128. Valores de la relación de llenado del Colector 6 - Red Soacha



Gráfica 129. Valores del esfuerzo cortante del Colector 6 - Red Soacha

4.10.7 Colector 7 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 12 tuberías y 13 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que en este el único que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) es el de recubrimiento mínimo.



Gráfica 130. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 7 - Red Soacha

Tabla 41. Costos del Colector 7 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

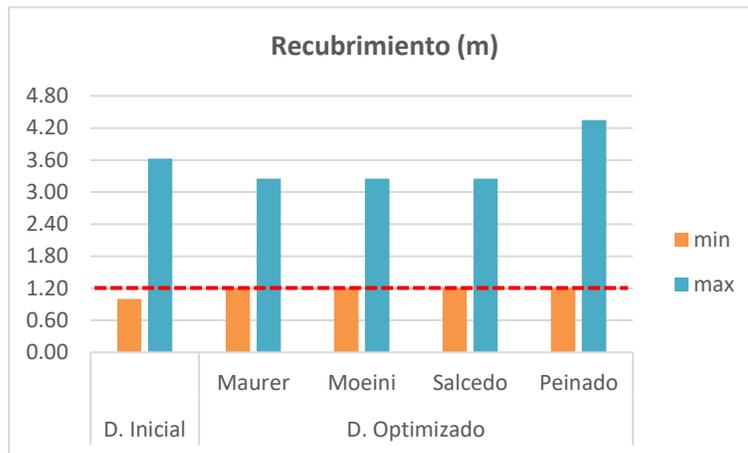
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 321,986	\$ 264,452	82.13
Moeini (IRR)	\$ 55,552	\$ 50,455	90.82
Salcedo (COP)	\$ 128,650,384	\$ 105,760,169	82.21
Peinado (COP)	\$ 109,717,052	\$ 96,581,259	88.03

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

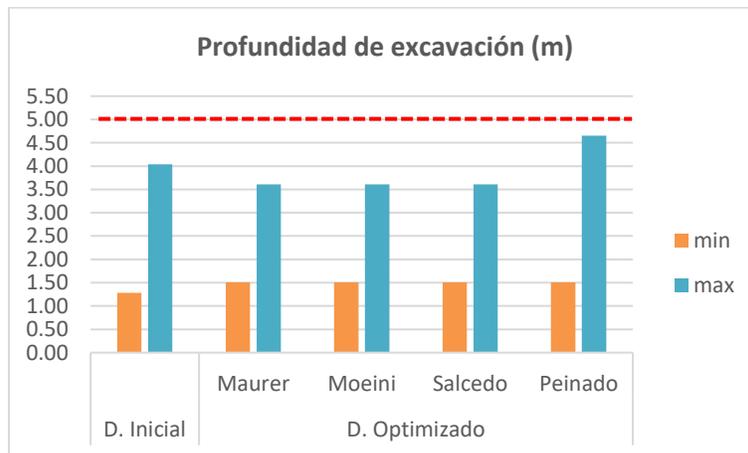
Tabla 42. Parámetros hidráulicos del Colector 7 - Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	min	1.00	1.21	1.21	1.21	1.21
	max	3.63	3.25	3.25	3.25	4.35
Profundidad de excavación (m)	min	1.28	1.51	1.51	1.51	1.51
	max	4.04	3.61	3.61	3.61	4.65
Velocidad de diseño (m/s)	min	0.89	0.87	0.87	0.87	0.87
	max	2.73	3.09	3.09	2.96	3.09
Relación de llenado (%)	min	4%	14%	14%	14%	14%
	max	98%	85%	85%	85%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	3.23	3.03	3.03	3.03	3.03
	max	32.37	31.42	31.42	28.63	31.42

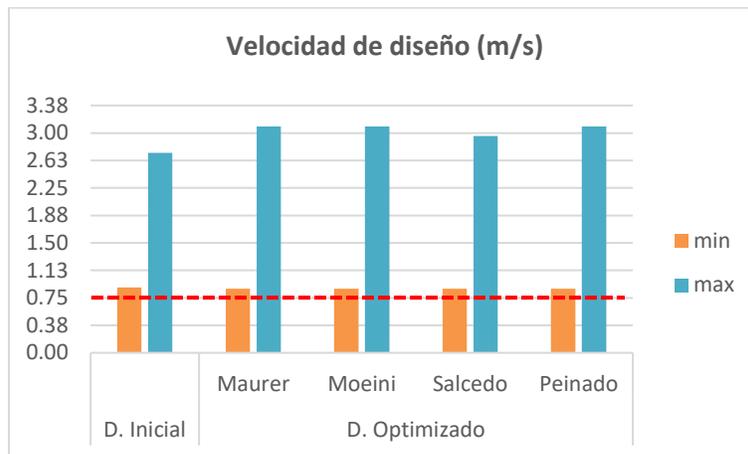
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



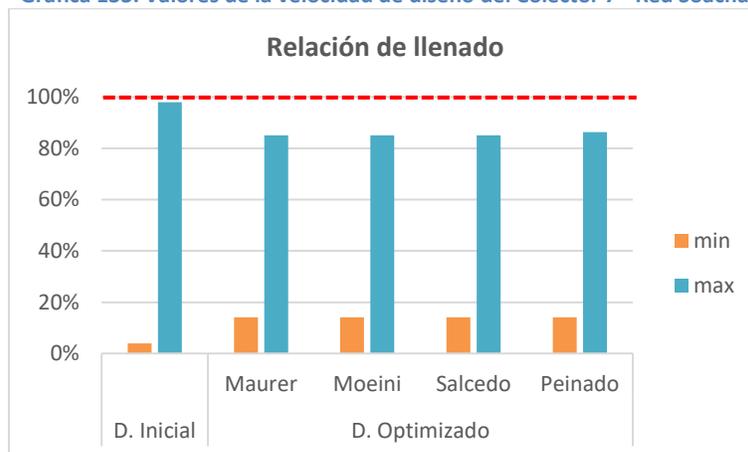
Gráfica 131. Valores del recubrimiento del Colector 7 - Red Soacha



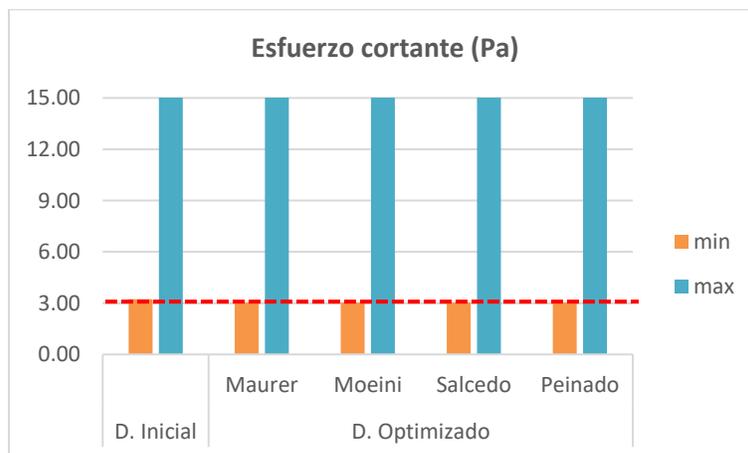
Gráfica 132. Valores de la profundidad de excavación del Colector 7 - Red Soacha



Gráfica 133. Valores de la velocidad de diseño del Colector 7 - Red Soacha



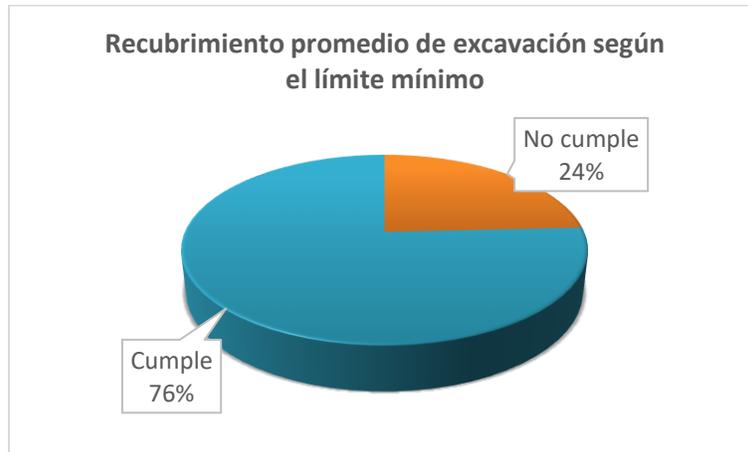
Gráfica 134. Valores de la relación de llenado del Colector 7 - Red Soacha



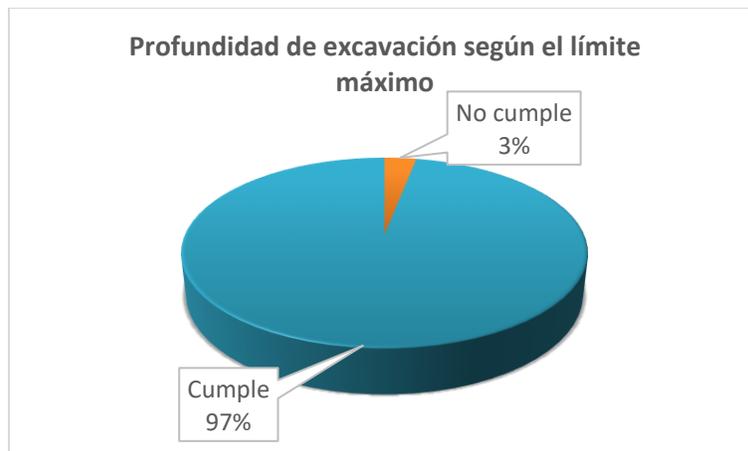
Gráfica 135. Valores del esfuerzo cortante del Colector 7 - Red Soacha

4.10.8 Colector 8 – Red Soacha

Este colector está compuesto por 33 tuberías y 34 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta se evidencio que se encuentra incumpliendo con lo establecido en la normativa que rige al proyecto (RAS 2000) el recubrimiento mínimo y la profundidad de excavación máxima.



Gráfica 136. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 8 - Red Soacha



Gráfica 137. Profundidad de excavación de diseño inicial según el límite mínimo. Colector 8 - Red Soacha

Tabla 43. Costos del Colector 8 - Red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 1,734,466	\$ 1,172,740	67.61
Moeini (IRR)	\$ 328,247	\$ 228,175	69.51

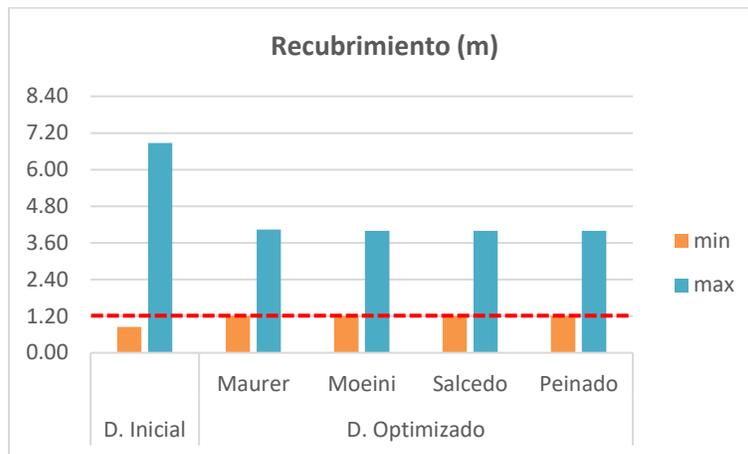
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Salcedo (COP)	\$ 751,471,593	\$ 503,527,530	67.01
Peinado (COP)	\$ 645,052,572	\$ 451,801,251	70.04

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

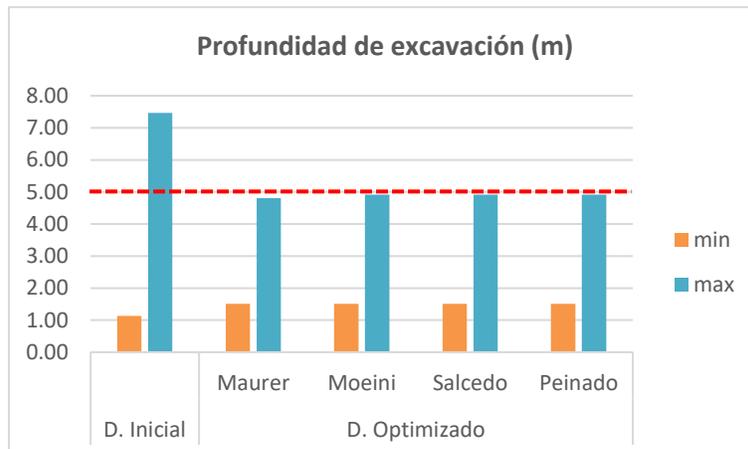
Tabla 44. Parámetros hidráulicos del Colector 8 - Red Soacha

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.85	1.20	1.20	1.20	1.20
	<i>max</i>	6.87	4.04	4.00	4.00	4.00
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.13	1.51	1.51	1.51	1.51
	<i>max</i>	7.46	4.80	4.91	4.91	4.91
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.87	0.97	0.97	0.97	0.97
	<i>max</i>	5.06	8.04	8.04	8.01	8.04
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	3%	12%	12%	12%	12%
	<i>max</i>	99%	86%	86%	86%	86%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	3.00	3.01	3.01	3.01	3.01
	<i>max</i>	75.36	161.25	161.25	160.64	157.96

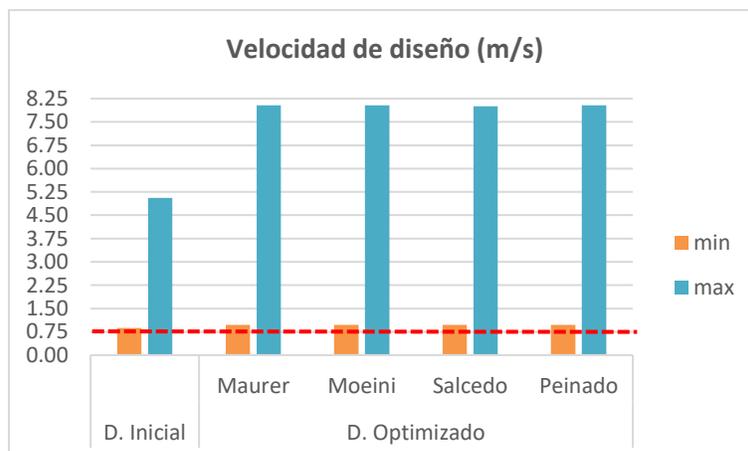
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



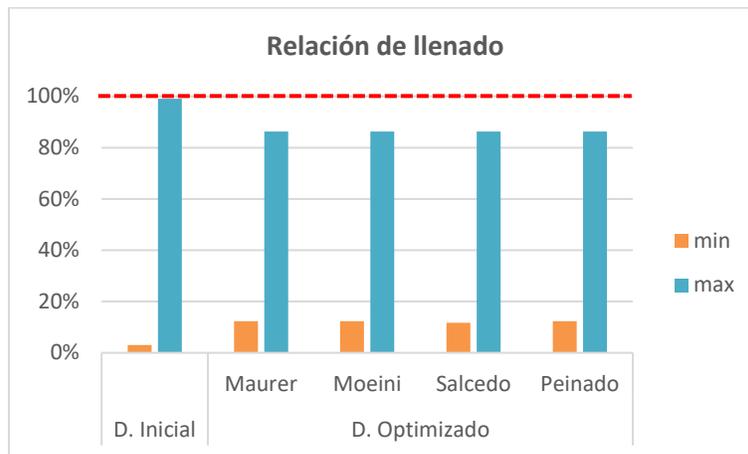
Gráfica 138 Valores del recubrimiento del Colector 8 - Red Soacha



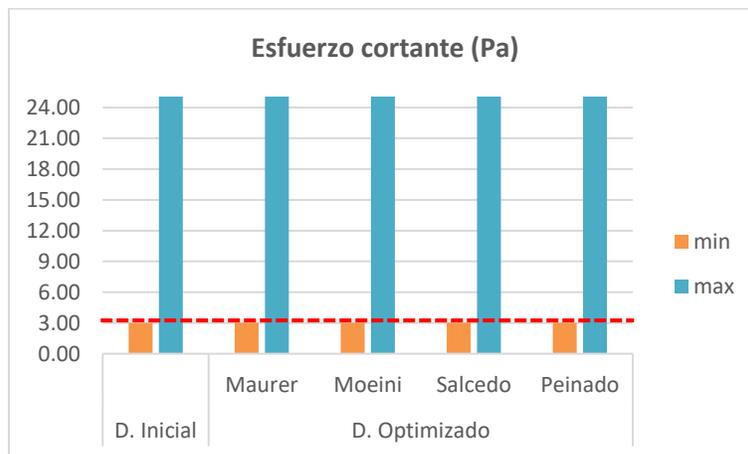
Gráfica 139. Valores de la profundidad de excavación del Colector 8 - Red Soacha



Gráfica 140. Valores de la velocidad de diseño del Colector 8 - Red Soacha



Gráfica 141. Valores de la relación de llenado del Colector 8 - Red Soacha



Gráfica 142. Valores del esfuerzo cortante del Colector 8 - Red Soacha

Teniendo los resultados de todos los colectores es posible calcular los costos con las ecuaciones correspondientes de toda la red.

Tabla 45. Costos de la red Soacha con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
Maurer (USD)	\$ 2,786,084	\$ 2,078,972	74.62
Moeini (IRR)	\$ 518,398	\$ 405,830	78.29
Salcedo (COP)	\$ 1,174,600,180	\$ 881,539,142	75.05
Peinado (COP)	\$ 1,008,503,834	\$ 789,560,036	78.29

4.11 Red Guáimaro

Esta es una red diseñada para suplir la necesidad de alcantarillado sanitario del municipio de Guáimaro en el departamento del Magdalena. Está formada por 178 tuberías y 114 nodos incluyendo la descarga, la ecuación hidráulica utilizada para el diseño fue Manning ($n= 0.011$).

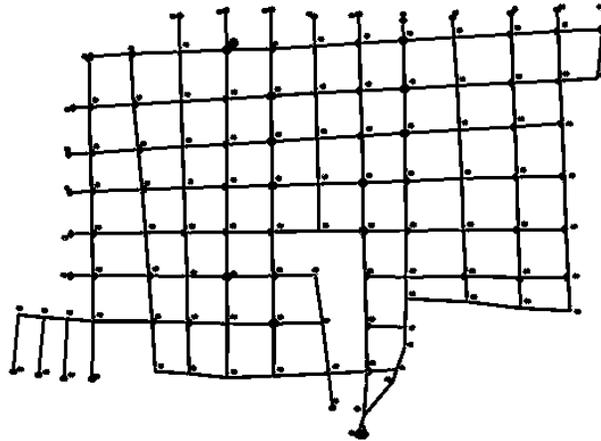
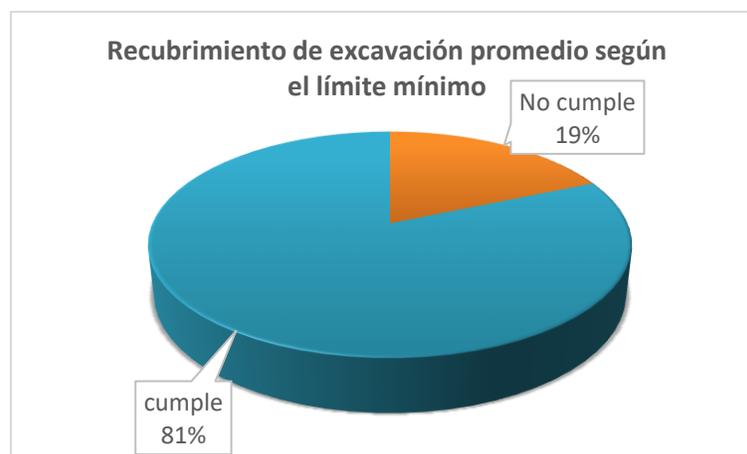


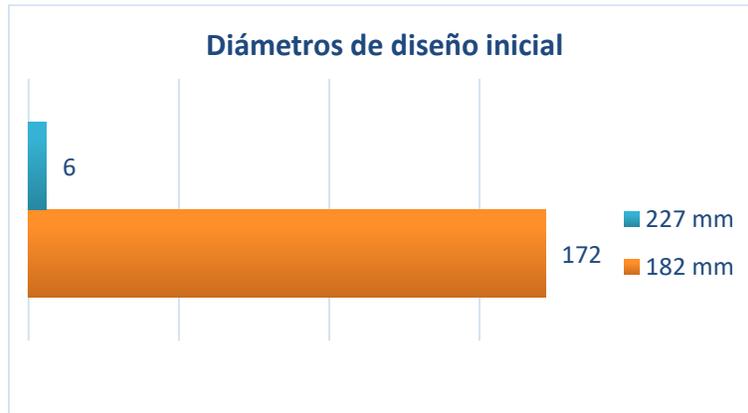
Ilustración 14. Topología de la red Guáimaro

En las siguientes graficas se puede apreciar los parámetros hidráulicos en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones en las memorias de cálculo del diseño inicial viabilizado pudo constatar que el valor del recubrimiento de excavación se encuentra bajo el límite mínimo permisible.



Gráfica 143. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Guáimaro

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 144. Diámetros internos de diseño inicial red Guáimaro

Tabla 46. Costos de la red Guáimaro con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 4,790,920	\$ 4,417,234	92.20
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 1,071,594	\$ 1,056,832	98.62
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 1,710,890,195	\$ 1,671,274,219	97.68
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 1,133,602,366	\$ 1,119,627,933	98.77

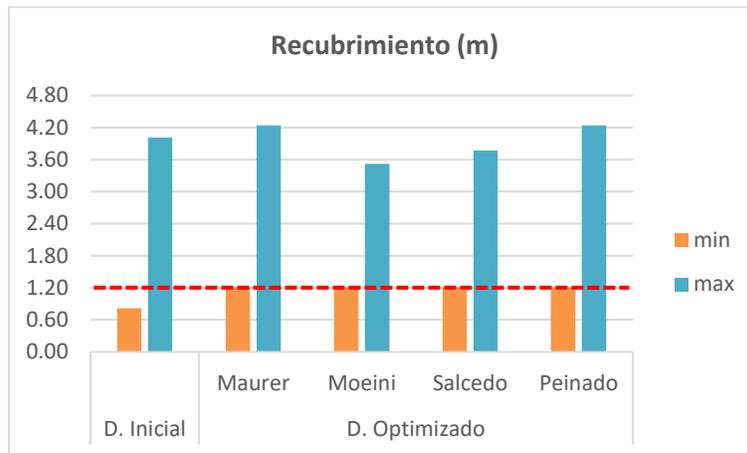
En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

Tabla 47. Parámetros hidráulicos de la red Guáimaro

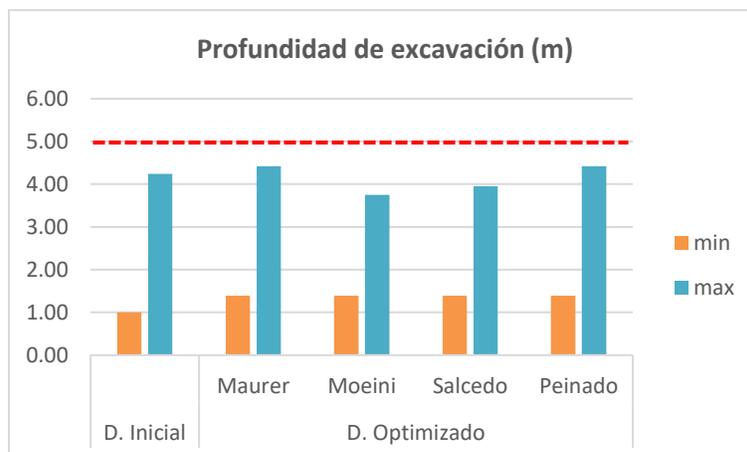
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.82	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	4.01	4.24	3.52	3.77	4.24
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.00	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	4.24	4.42	3.75	3.95	4.42
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.45	0.48	0.48	0.48	0.48
	<i>max</i>	1.03	1.43	0.96	1.43	1.43

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Relación de llenado (%)	min	15%	11%	11%	11%	11%
	max	79%	84%	84%	84%	84%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00
	max	5.18	6.34	4.66	6.34	6.34

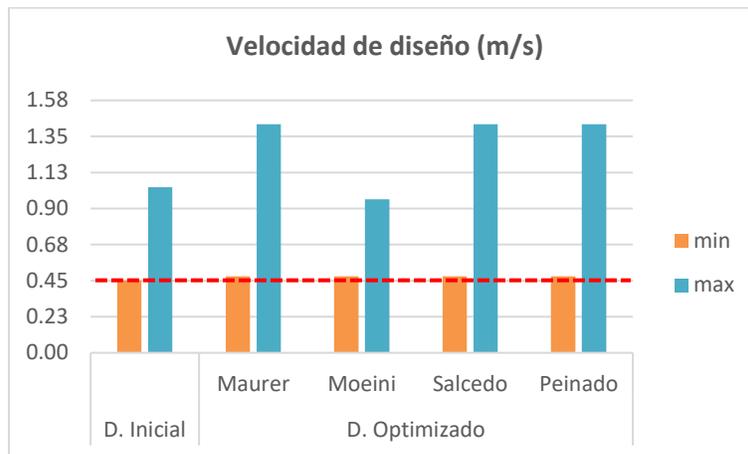
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



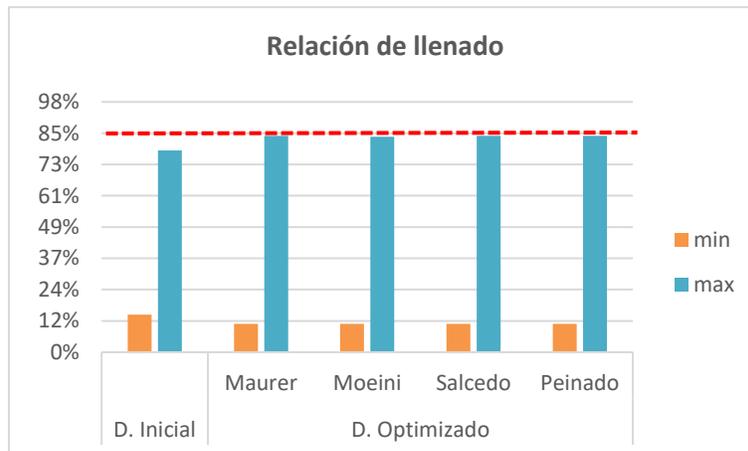
Gráfica 145. Valores del recubrimiento de la red Guáimaro



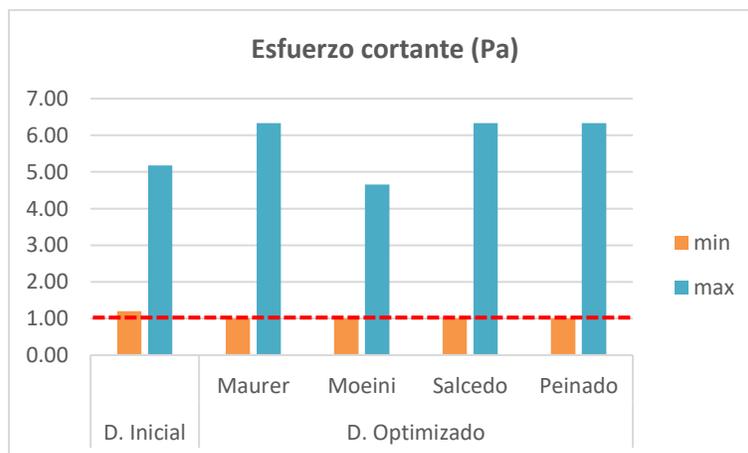
Gráfica 146. Valores de la profundidad de excavación de la red Guáimaro



Gráfica 147. Valores de la velocidad de diseño de la red Guáimaro



Gráfica 148. Valores de la relación de llenado de la red Guáimaro



Gráfica 149. Valores del esfuerzo cortante de la red Guáimaro

4.12 Red Concordia

Esta red está compuesta por dos sectores (norte y sur), en su totalidad cuenta con 231 tuberías y 171 nodos, incluyendo las dos descargas. Fue diseñada con la ecuación de Manning ($n= 0.01$) para conformar el alcantarillado sanitario del municipio de Concordia, Magdalena.

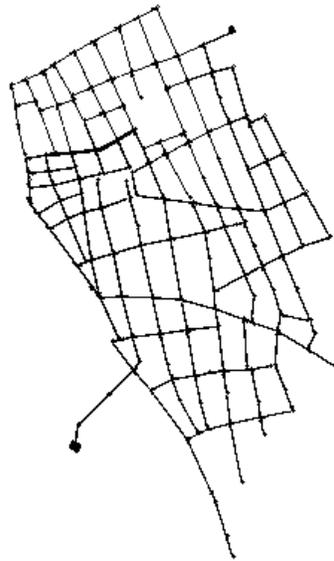
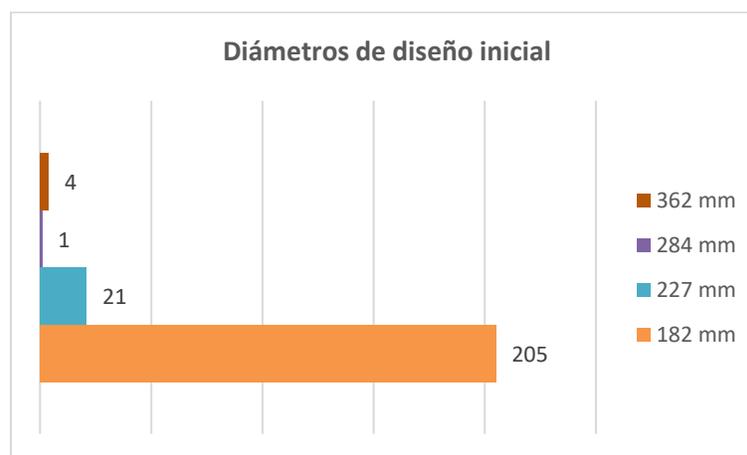


Ilustración 15. Topología de la red Concordia

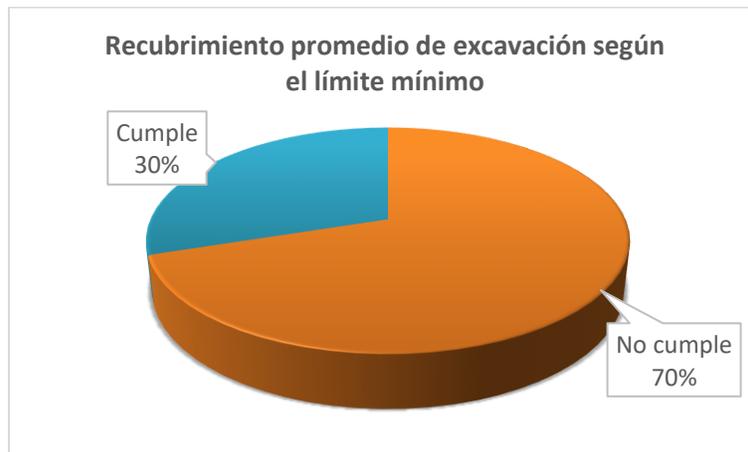
Para realizar la optimización de la red y las debidas verificaciones es necesario individualizar los sectores que la conforman debido a que cada uno tiene su descarga independiente. Dicha optimización se realiza con base a la misma lista de diámetros utilizadas en el proyecto inicial.



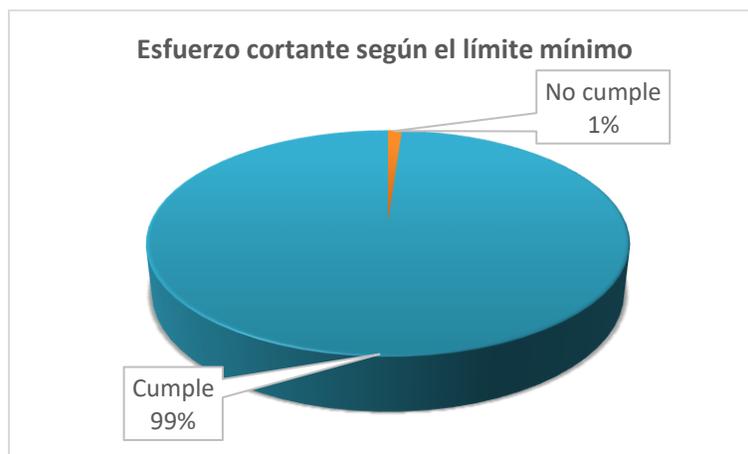
Gráfica 150. Diámetros internos de diseño inicial red Concordia

4.12.1 Sector norte – Red Concordia

Este sector está compuesto por 90 tuberías y 68 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidenció que en este sector el recubrimiento y esfuerzo cortante se encuentran por debajo del valor mínimo permitido.



Gráfica 151. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Sector norte - Red Concordia



Gráfica 152. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector norte - Red Concordia

Tabla 48. Costos del Sector norte - Red Concordia con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Maurer (USD)	\$ 2,152,762	\$ 2,006,178	93.19

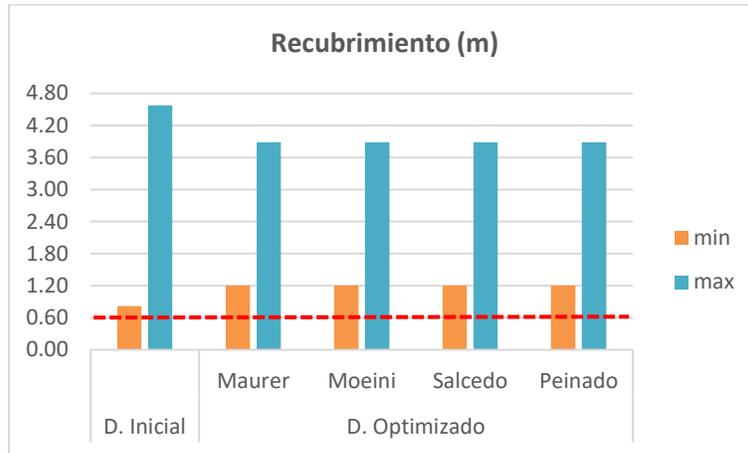
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Moeini (IRR)	\$ 484,945	\$ 457,069	94.25
Salcedo (COP)	\$ 848,698,522	\$ 612,976,968	72.23
Peinado (COP)	\$ 556,320,718	\$ 552,631,717	99.34

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

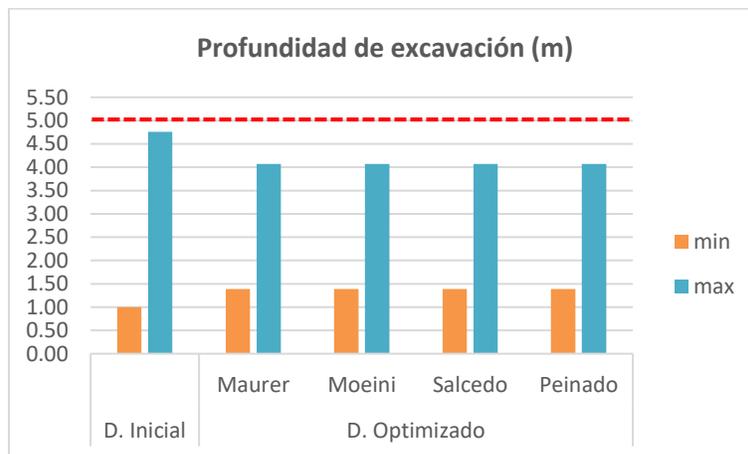
Tabla 49. Parámetros hidráulicos del Sector norte - Red Concordia

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.82	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	4.58	3.89	3.89	3.89	3.89
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	1.00	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	4.76	4.07	4.07	4.07	4.07
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.45	0.52	0.52	0.52	0.52
	<i>max</i>	1.78	1.98	1.98	1.92	1.98
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	8%	7%	7%	7%	7%
	<i>max</i>	76%	85%	70%	85%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	<i>max</i>	24.06	19.33	19.33	18.07	19.33

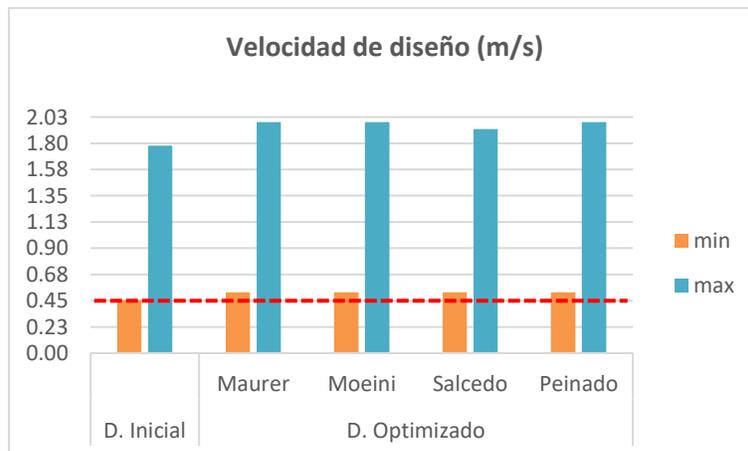
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



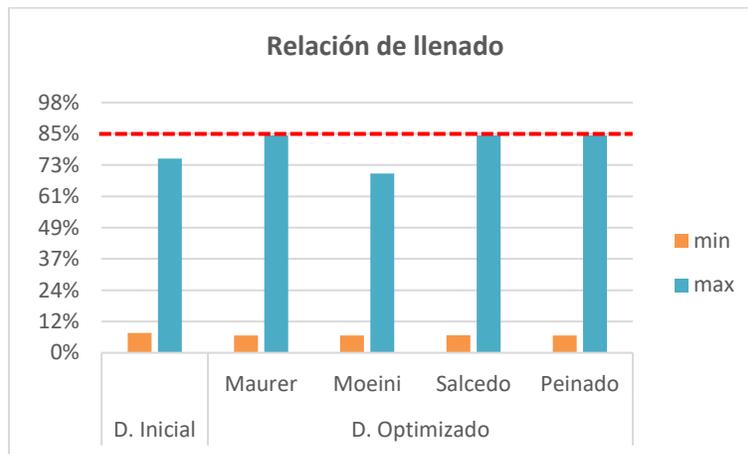
Gráfica 153. Valores del recubrimiento del Sector norte - Red Concordia



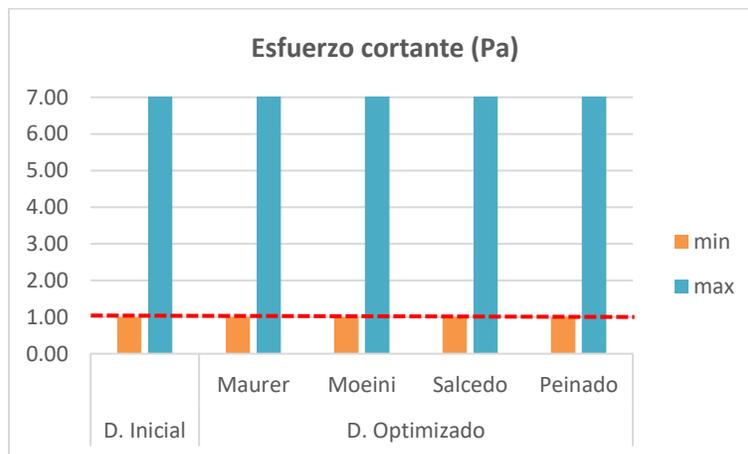
Gráfica 154. Valores de la profundidad de excavación del Sector norte - Red Concordia



Gráfica 155. Valores de la velocidad de diseño del Sector norte - Red Concordia



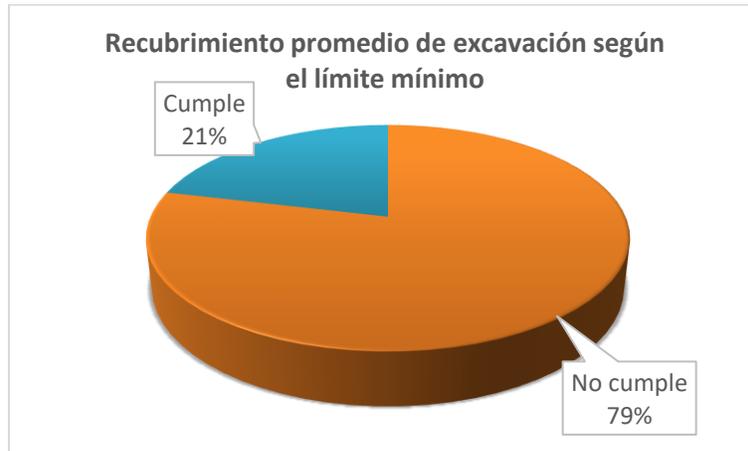
Gráfica 156. Valores de la relación de llenado del Sector norte - Red Concordia



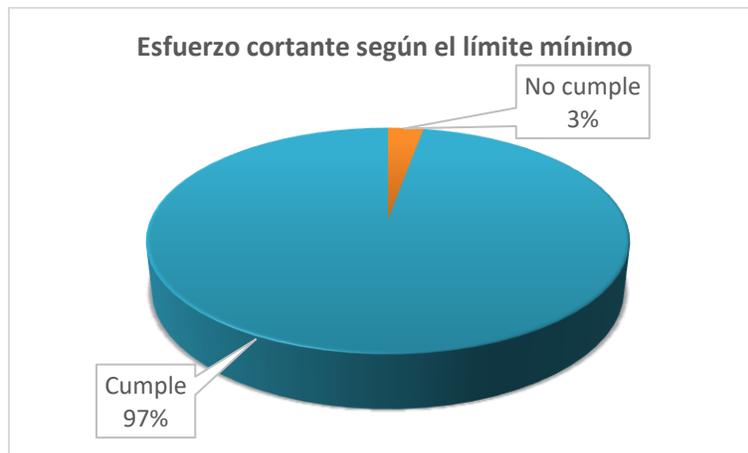
Gráfica 157. Valores del esfuerzo cortante del Sector norte - Red Concordia

4.12.2 Sector sur – Red Concordia

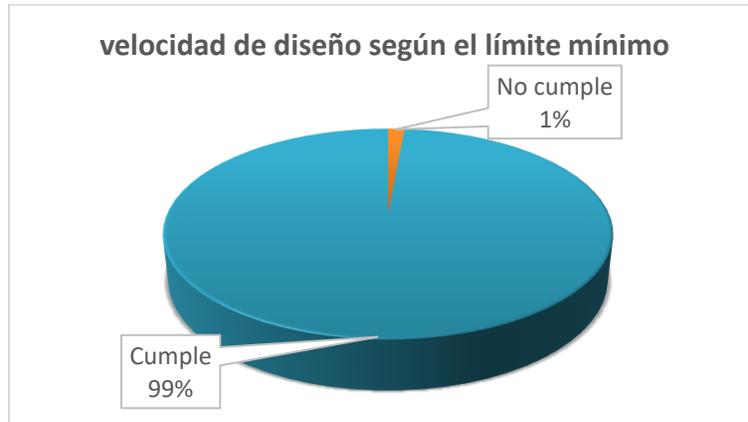
Este sector está compuesto por 141 tuberías y 103 nodos. Haciendo las verificaciones de los valores en cuanto a los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta como restricciones de diseño, se evidencio que en este sector el recubrimiento, esfuerzo cortante y velocidad de diseño se encuentran por debajo del valor mínimo permitido.



Gráfica 158. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia



Gráfica 159. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia



Gráfica 160. Esfuerzo cortante de diseño inicial según el límite mínimo. Sector sur - Red Concordia

Tabla 50. Costos del Sector sur - Red Concordia con las diferentes ecuaciones

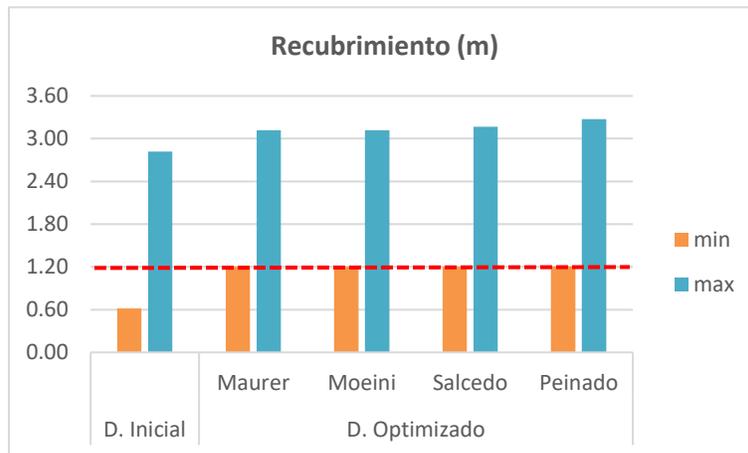
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 2,851,873	\$ 2,838,897	99.54
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 560,389	\$ 632,410	112.85
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 915,070,774	\$ 865,557,116	94.59
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 778,781,271	\$ 798,950,442	102.59

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos del colector que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

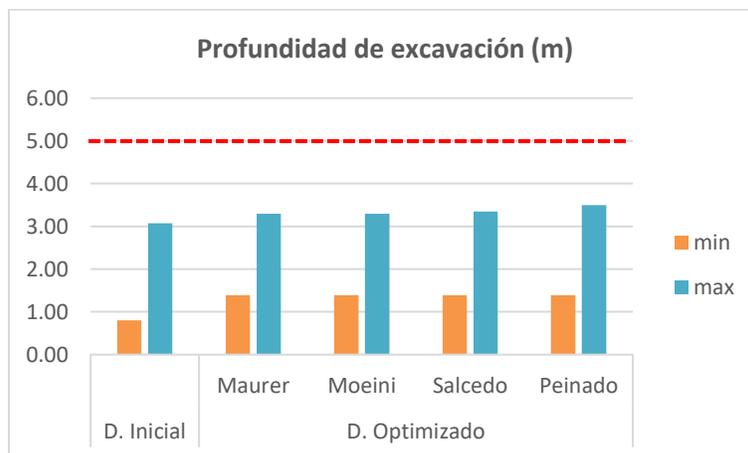
Tabla 51. Parámetros hidráulicos del Sector sur - Red Concordia

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.62	1.20	1.20	1.20	1.21
	<i>max</i>	2.82	3.12	3.12	3.17	3.27
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.80	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	3.07	3.30	3.30	3.35	3.50
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.44	0.52	0.52	0.52	0.52
	<i>max</i>	1.78	2.01	2.01	1.95	2.01
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	8%	7%	7%	7%	7%
	<i>max</i>	71%	85%	85%	85%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	0.78	1.00	1.00	1.00	1.00
	<i>max</i>	24.00	19.82	19.82	18.75	19.82

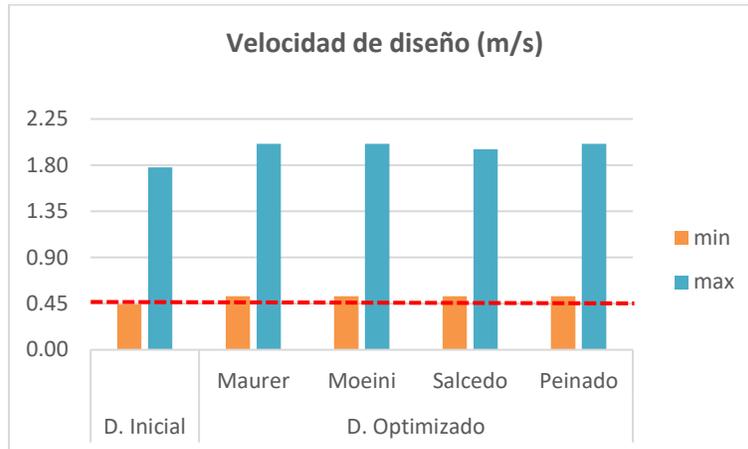
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



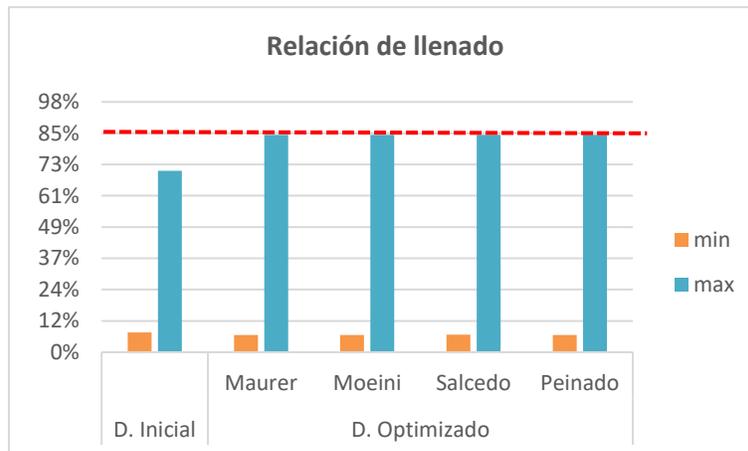
Gráfica 161. Valores del recubrimiento del Sector sur - Red Concordia



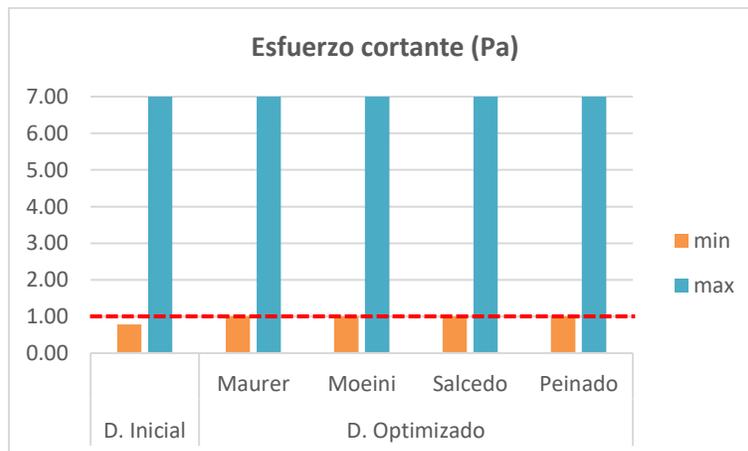
Gráfica 162. Valores de la profundidad de excavación del Sector sur - Red Concordia



Gráfica 163. Valores de la velocidad de diseño del Sector sur - Red Concordia



Gráfica 164 Valores de la relación de llenado del Sector sur - Red Concordia



Gráfica 165. Valores del esfuerzo cortante del Sector sur - Red Concordia

4.13 Red Caracolí

Esta red hace parte del sistema de alcantarillado sanitario del municipio de Caracolí en el departamento de Antioquía. Fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n= 0.011$). Está formada por 19 tuberías y 20 nodos incluyendo la descarga.

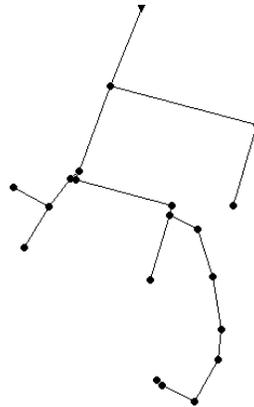
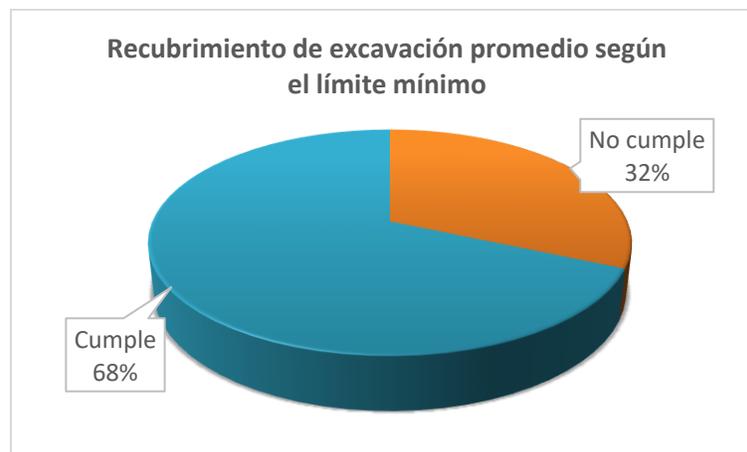


Ilustración 16. Topología de la red Caracolí

En las siguientes graficas se puede apreciar los parámetros hidráulicos en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones en las memorias de cálculo del diseño inicial viabilizado pudo constatar que el valor del recubrimiento de excavación se encuentra bajo el límite mínimo permisible.



Gráfica 166. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red Caracolí

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial, en este caso todas las tuberías son de 182 mm, y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.

Tabla 52. Costos de la red Caracolí con las diferentes ecuaciones

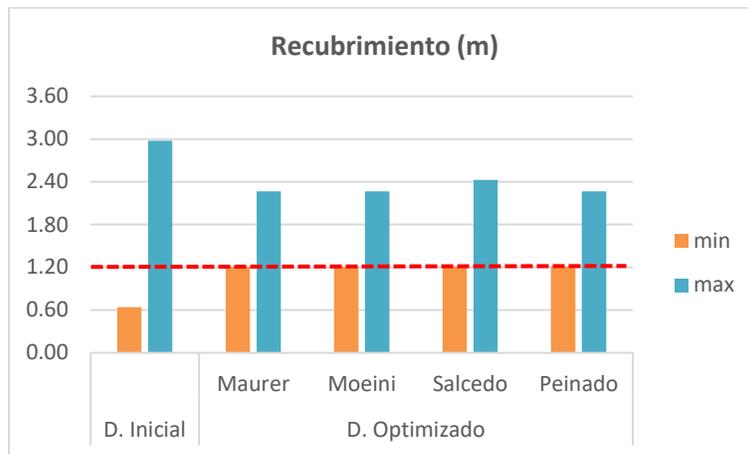
Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	Inicial	Optimizado	
Maurer (USD)	\$ 216,854	\$ 200,680	92.54
Moeini (IRR)	\$ 47,150	\$ 46,535	98.70
Salcedo (COP)	\$ 100,249,004	\$ 78,422,919	78.23
Peinado (COP)	\$ 81,640,989	\$ 82,673,987	101.27

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente.

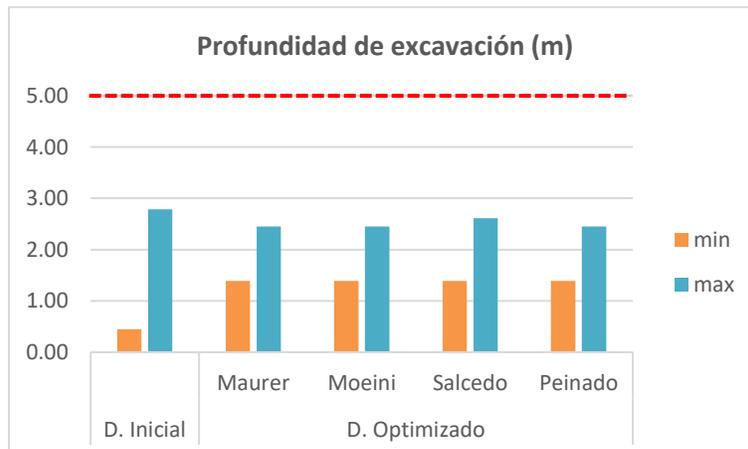
Tabla 53. Parámetros hidráulicos de la red Caracolí

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.64	1.21	1.21	1.21	1.21
	<i>max</i>	2.98	2.27	2.27	2.43	2.27
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.45	1.39	1.39	1.39	1.39
	<i>max</i>	2.79	2.45	2.45	2.61	2.45
Velocidad de diseño (m/s)	<i>min</i>	0.48	0.52	0.52	0.52	0.52
	<i>max</i>	2.01	2.19	2.19	2.10	2.19
Relación de llenado (%)	<i>min</i>	1%	6%	6%	6%	6%
	<i>max</i>	6%	17%	17%	17%	17%
Esfuerzo Cortante (Pa)	<i>min</i>	1.15	1.00	1.00	1.00	1.00
	<i>max</i>	23.63	24.17	24.17	22.01	24.17

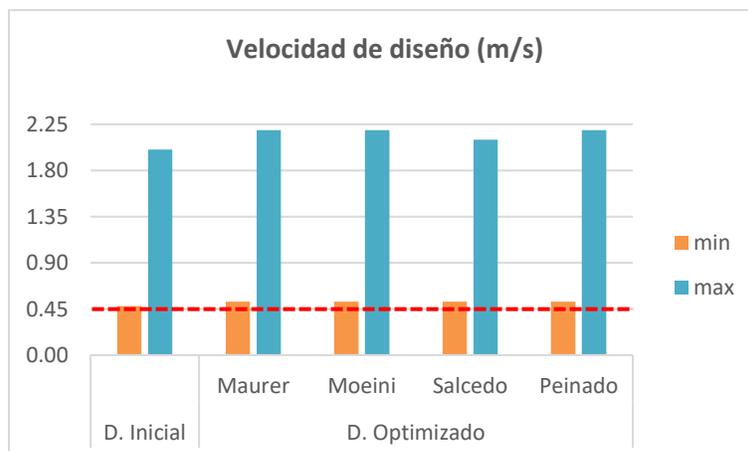
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



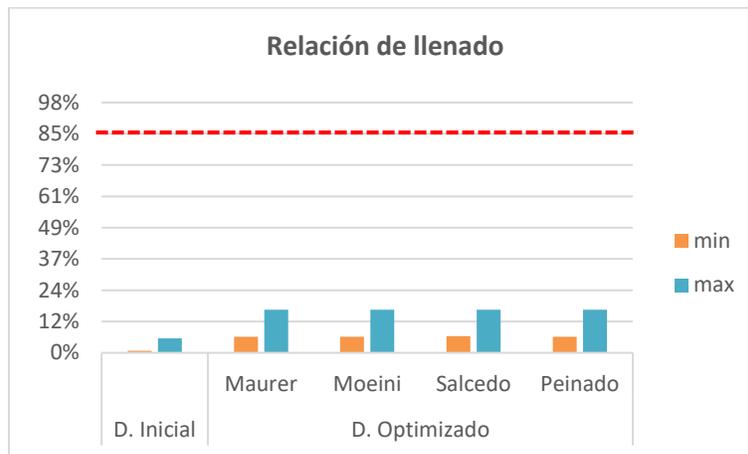
Gráfica 167. Valores del recubrimiento de la red Caracolí



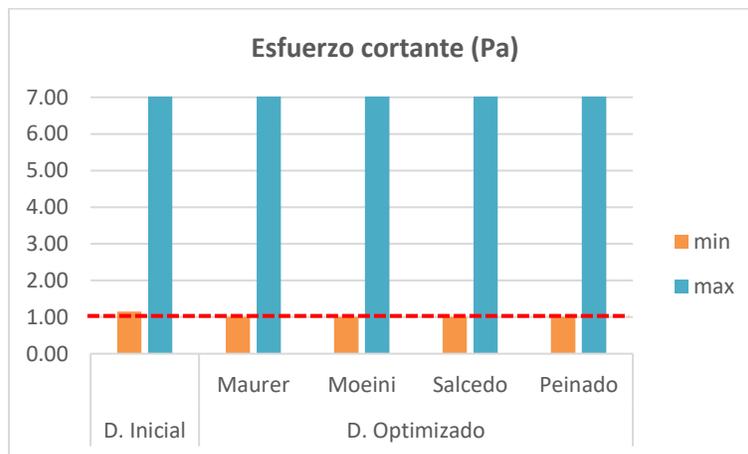
Gráfica 168. Valores de la profundidad de excavación de la red Caracolí



Gráfica 169. Valores de la velocidad de diseño de la red Caracolí



Gráfica 170. Valores de la relación de llenado de la red Caracolí



Gráfica 171. Valores del esfuerzo cortante de la red Caracolí

4.14 Red La Junta

Esta red fue diseñada con la ecuación hidráulica de Manning ($n=0.01$) para recolectar y transportar las aguas residuales de La Junta en el departamento de La Guajira. Cuenta con 114 tuberías y 105 nodos incluyendo la descarga.

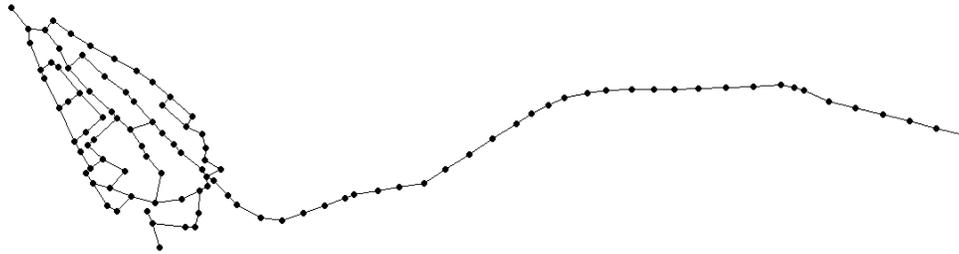
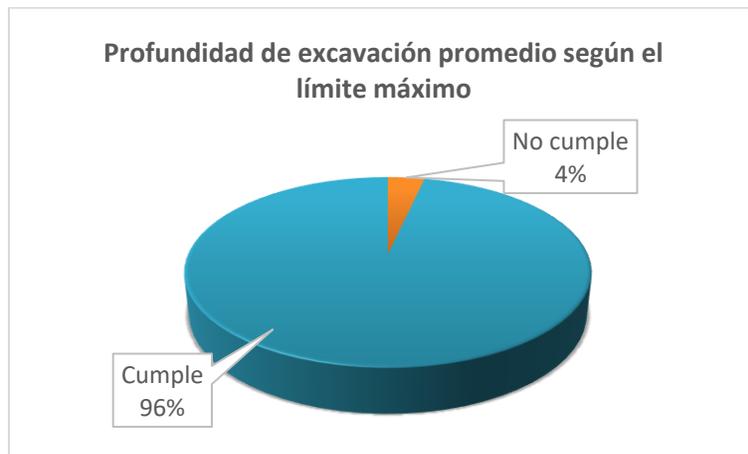


Ilustración 17. Topología de la red La Junta

En las siguientes graficas se puede apreciar los parámetros hidráulicos en los cuales no se cumplen algunas restricciones de diseño, pues luego de hacer las respectivas verificaciones en las memorias de cálculo del diseño inicial viabilizado pudo constatar que el valor del recubrimiento de excavación se encuentra bajo el límite mínimo permisible y por otra parte la profundidad de excavación y la relación de llenado superan el límite máximo de la restricción.



Gráfica 172. Recubrimiento de excavación promedio de diseño inicial según el límite mínimo. Red La Junta



Gráfica 173. Profundidad de excavación promedio de diseño inicial según el límite máximo. Red La Junta



Gráfica 174. Relación de llenado de diseño inicial según el límite máximo. Red La Junta

Para el diseño optimizado de la red se toma la misma lista de diámetros disponible para el diseño inicial y se evalúan las ecuaciones de costo con las restricciones de diseño establecidas por la normativa bajo la cual se diseñó.



Gráfica 175. Diámetros internos de diseño inicial red La Junta

Tabla 54. Costos de la red La Junta con las diferentes ecuaciones

Ecuación	Costo		% con respecto al diseño inicial
	inicial	optimizado	
<i>Maurer (USD)</i>	\$ 4,346,979	\$ 3,806,754	87.57
<i>Moeini (IRR)</i>	\$ 842,393	\$ 794,079	94.26
<i>Salcedo (COP)</i>	\$ 1,589,792,271	\$ 1,016,977,680	63.97
<i>Peinado (COP)</i>	\$ 1,144,871,368	\$ 1,078,937,833	94.24

En la siguiente tabla se encuentra la información sobre los parámetros hidráulicos de la red que se consideraron como restricciones al momento del proceso de optimización, y cuyos valores permisibles depende de la normativa bajo la cual se diseñó la red inicialmente. El esfuerzo cortante, a pesar de que la norma toma como valor mínimo 1 Pa, el proyecto en su documento recomendaba 1.2 Pa y sobre este último valor fue que se realizó la optimización.

Cabe resaltar que estableciendo como profundidad de excavación máxima permitida 5 m, que es lo que establece la normativa, no se logró obtener una solución por lo que se amplió este límite hasta obtener una solución en el diseño hidráulico de la red.

Tabla 55. Parámetros hidráulicos de la red La Junta

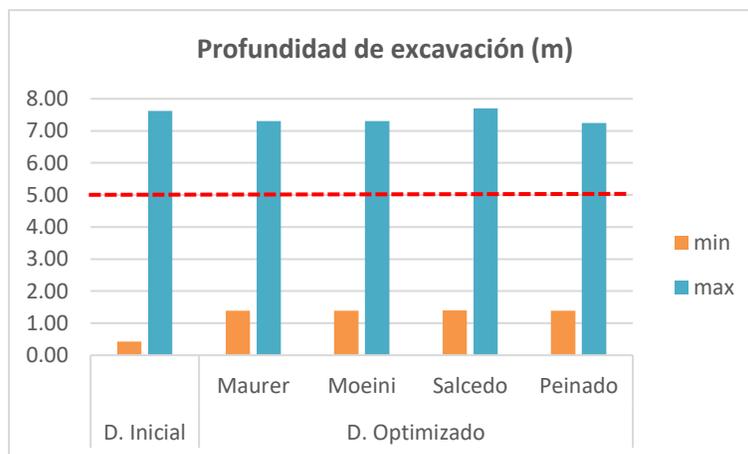
Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			<i>Maurer</i>	<i>Moeini</i>	<i>Salcedo</i>	<i>Peinado</i>
Recubrimiento (m)	<i>min</i>	0.24	1.20	1.21	1.22	1.20
	<i>max</i>	7.26	6.97	6.97	7.37	6.91
Profundidad de excavación (m)	<i>min</i>	0.43	1.39	1.39	1.40	1.39
	<i>max</i>	7.62	7.30	7.3	7.70	7.24
	<i>min</i>	0.49	0.57	0.57	0.60	0.57

Parámetros hidráulicos	Rango	D. Inicial	D. Optimizado			
			Maurer	Moeini	Salcedo	Peinado
Velocidad de diseño (m/s)	max	2.60	3.04	3.00	3.04	3.04
Relación de llenado (%)	min	2%	10%	10%	10%	10%
	max	99%	85%	85%	85%	85%
Esfuerzo Cortante (Pa)	min	1.20	1.20	1.20	1.27	1.20
	max	27.06	24.52	23.98	24.52	24.52

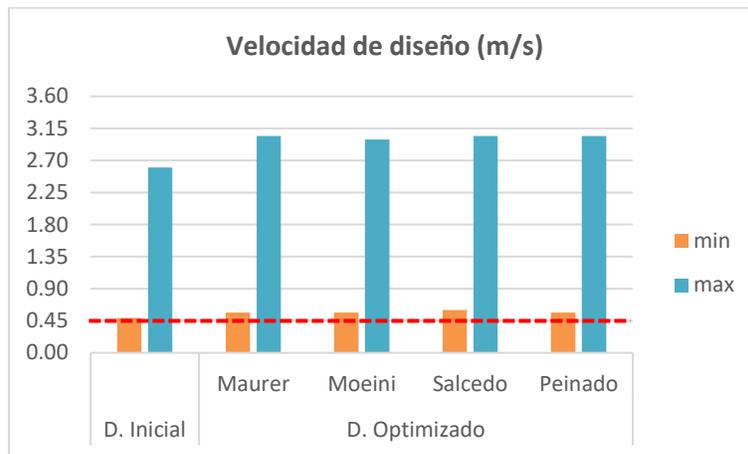
En las siguientes graficas se puede evidenciar claramente los valores de la tabla anterior. La línea punteada señala los límites permisibles, máximos o mínimos dependiendo del parámetro hidráulico. Representa límites mínimos en: Recubrimiento, velocidad de diseño y esfuerzo cortante. Mientras que indica el límite máximo en: Profundidad de excavación y relación de llenado.



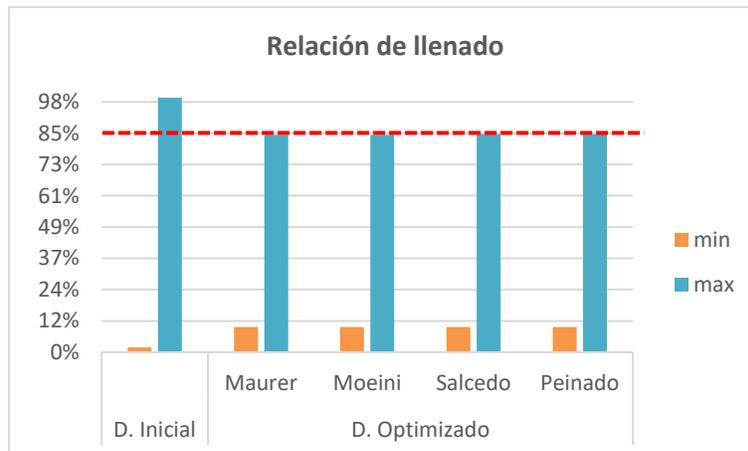
Gráfica 176. Valores del recubrimiento de la red La Junta



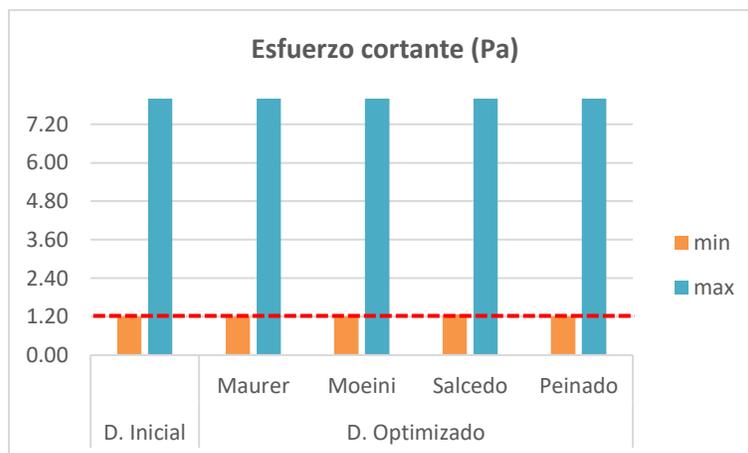
Gráfica 177. Valores de la profundidad de excavación de la red La Junta



Gráfica 178. Valores de la velocidad de diseño de la red La Junta



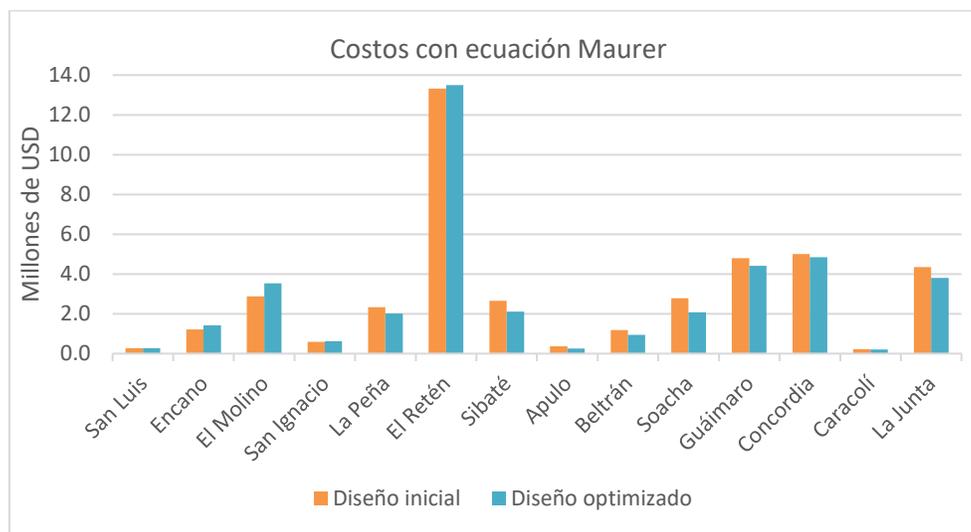
Gráfica 179. Valores de la relación de llenado de la red La Junta



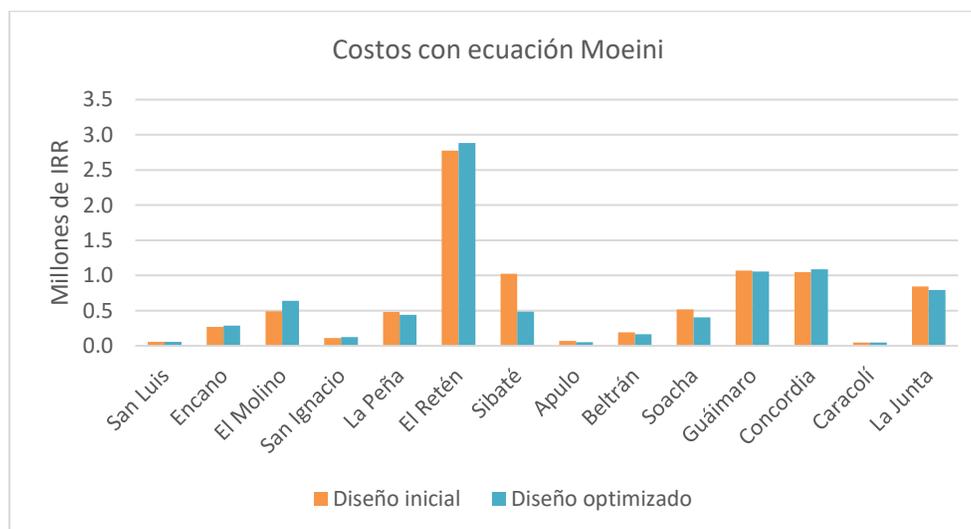
Gráfica 180. Valores del esfuerzo cortante de la red La Junta

4.15 Resumen de resultados

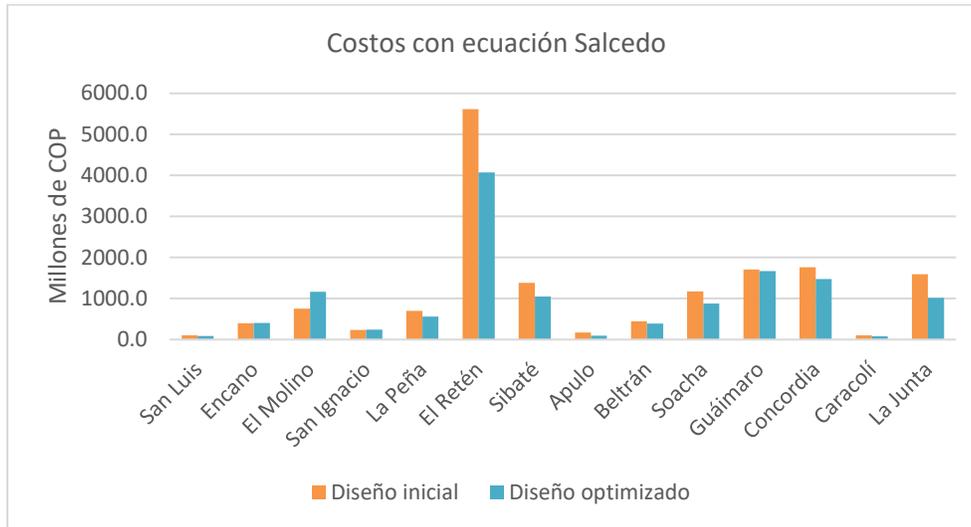
En las siguientes graficas se puede ver el comportamiento de los costos de las redes (iniciales y los arrojados por UTOPIA) con las diferentes ecuaciones.



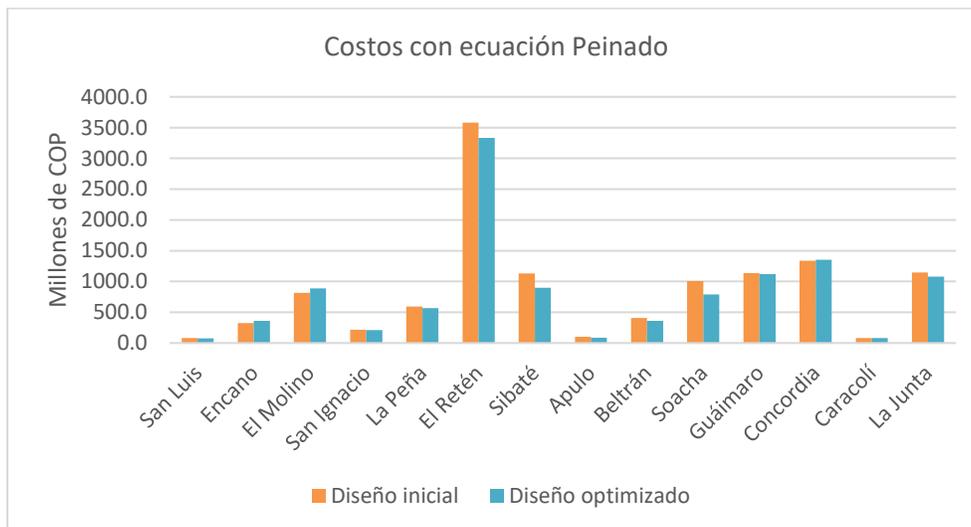
Gráfica 181. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Maurer (2010).



Gráfica 182. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Moeini (2012).



Gráfica 183. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Salcedo (2012).



Gráfica 184. Costo de las redes de acuerdo a la ecuación de Peinado (2016).

Como se evidencia en las anteriores gráficas, en algunas de las redes analizadas se logran importantes cambios en cuanto al costo. Cada escenario de optimización está controlado por la ecuación de costo que se utiliza en el diseño, los cuales involucran características particulares dependiendo de la naturaleza de la ecuación de costo y lo que esta involucre. Por esta razón resulta interesante ver la variabilidad de los parámetros hidráulicos tenidos en cuenta en este trabajo en cada uno de estos escenarios, de manera que se pueda realizar una comparación entre los diseños logrados y los iniciales, es decir, los viabilizados.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Conforme a los resultado se observa que se calcularon ocho costos con valores diferentes por cada red. Esto como resultado de evaluar las cuatro ecuaciones (Maurer, Moeini, Salcedo y Peinado) en los diseños iniciales, bajo las condiciones con las que los proyectos fueron presentados y radicados ante el mecanismo de viabilización de proyectos del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – MVCT, y los resultados de las mismas cuatro ecuaciones de costos pero con las condiciones arrojadas por UTOPIA.

Inicialmente es necesario establecer que los resultados no arrojan las redes analizadas de manera que cumplan un 100% los parámetros hidráulicos establecidos por la norma, específicamente con la profundidad máxima de excavación. Esto se presentó en el caso de la red sanitaria *La Junta* y en la red pluvial *Colector 2 – Red Beltrán*. Esto se le atribuye a las características propias del terreno donde se construye el proyecto, el cual debido a su topografía, no ofrece condiciones para que la profundidad de excavación se encuentre dentro de los límites permisibles. En estos casos el límite máximo del rango se fue ampliando gradualmente hasta que UTOPIA lograra un resultado en el diseño hidráulico de la red.

Cabe resaltar la profundidad de excavación es un parámetro fundamental al momento de calcular el costo de la red en todas las ecuaciones que se utilizaron en este trabajo, y el hecho de que se profundizara más no implicó necesariamente que aumentara el costo. Esto se evidencia claramente en los resultados obtenidos con la red sanitaria *La Junta*. En este caso la profundidad máxima de excavación de la red es 1.52 veces mayor que la permitida por el RAS y con UTOPIA alcanzo a ser 1.54 veces mayor (solución arrojada con la ecuación de Salcedo), pero a pesar de esto se logró una reducción del costo hasta del 36% en comparación con el diseño inicial. Esto producto a la optimización de los diámetros de tuberías utilizados, pues en muchos casos el diseño hidráulico arrojado por UTOPIA consideraba innecesario la tubería con mayor diámetro disponible, reduciendo así el costo de los tramos.

En cuanto a los demás parámetros hidráulicos, se encontró como constante en todos los proyectos analizados que el recubrimiento mínimo de las tuberías no está siendo respetado, llegando a valores por debajo de la mitad de lo establecido por la normativa colombiana, lo que afecta la seguridad de las tuberías y de la comunidad alrededor. Esta observación da pie para el cuestionamiento sobre la adaptabilidad que tiene esta restricción, pues aunque es claro el objetivo de establecer una profundidad mínima sobre la cota clave de las tuberías con respecto a la cota rasante, parece no ser lo más apropiado para las diferentes topografías y tipologías de red que se instalan en el territorio colombiano.

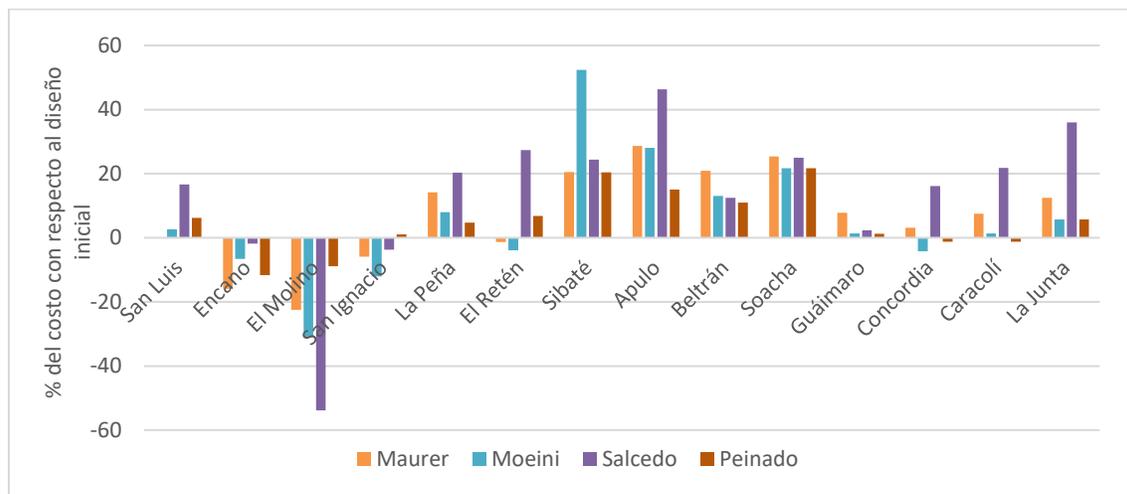
Por otro lado, la velocidad que se establece como máxima no fue un problema en las redes que se analizaron (todas con materiales plásticos), pues siempre los valores se encontraban bastante por

debajo del límite máximo. Por lo anterior se puede afirmar que los problemas ocasionados por altas velocidades en los tramos están bajo control. El esfuerzo cortante mostró ser un parámetro de alta importancia y bastante sensible al momento de realizar el diseño hidráulico de la red y que es respetado casi en la totalidad de las redes analizadas de la misma manera que lo es la velocidad de diseño.

Cada ecuación de costo representó un escenario de optimización diferente, a pesar de que el rango de valores de cada parámetro hidráulico tenido en cuenta no variara significativamente entre escenarios, los porcentajes de reducción y/o aumento de costo sí lo hacían. La disminución del valor del costo se considera como un ahorro que se hubiese podido realizar si las metodologías de optimización hubiesen sido implementadas en vez del método tradicional de diseño. Entonces, se procedió a calcular el ahorro total que hubiese representado sumando los costos iniciales y los arrojados por UTOPIA para cada una de las redes.

Tabla 56. Total ahorro logrado con las diferentes ecuaciones de costo

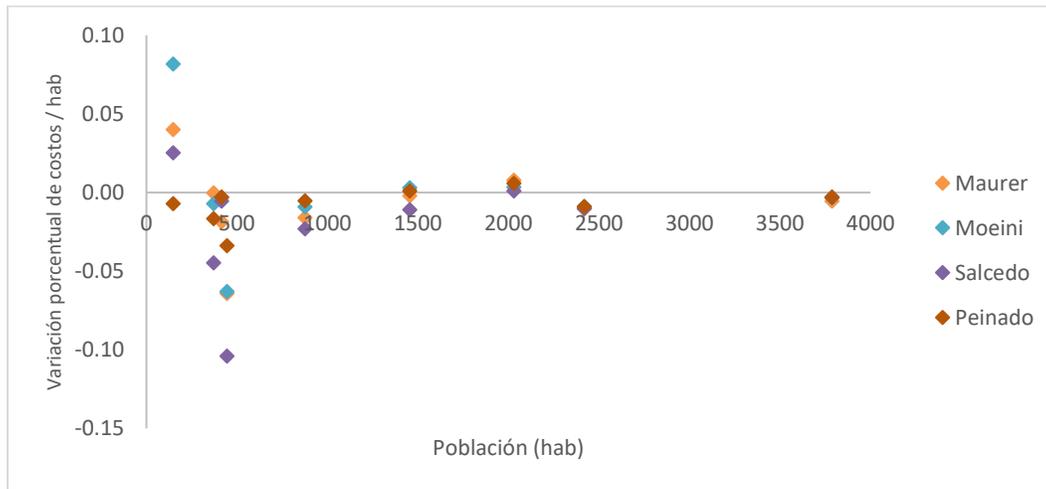
Ahorro			
Maurer (USD)	Moeini (IRR)	Salcedo (COP)	Peinado (COP)
\$ 1,969,917	\$ 463,438	\$ 2,957,881,390	\$ 741,611,355



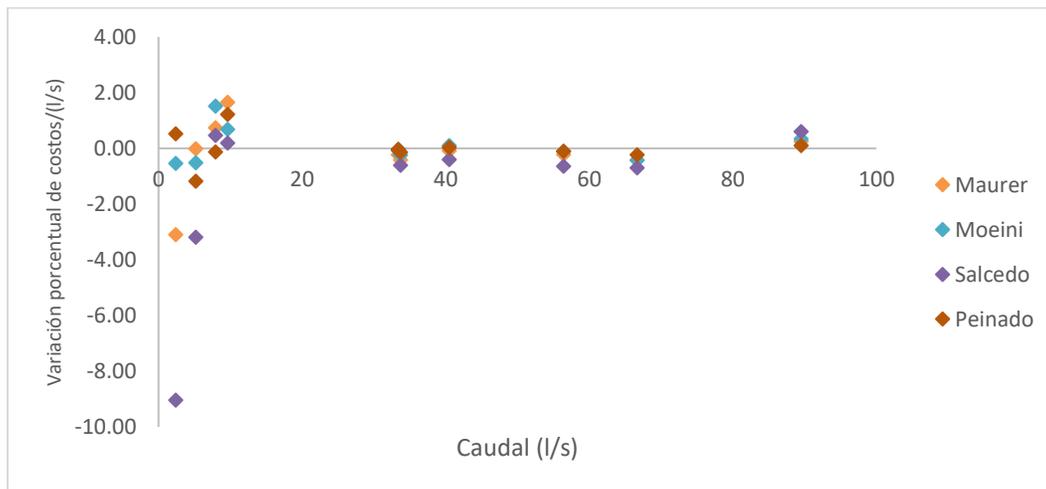
Gráfica 185. Valor porcentual de la diferencia de costo de las redes

En la anterior gráfica es evidente que no todas las redes disminuyeron el costo luego del proceso de optimización (valores negativos). Esto debido a que inicialmente no contaban con las características necesarias en sus parámetros de diseño y ajustar esto a lo establecido por la normativa significaba en muchos casos aumentar el costo.

El cambio porcentual de los costos de las redes se analizó en relación con características como la población servida, caudal en la descarga y el número de tuberías de la red.

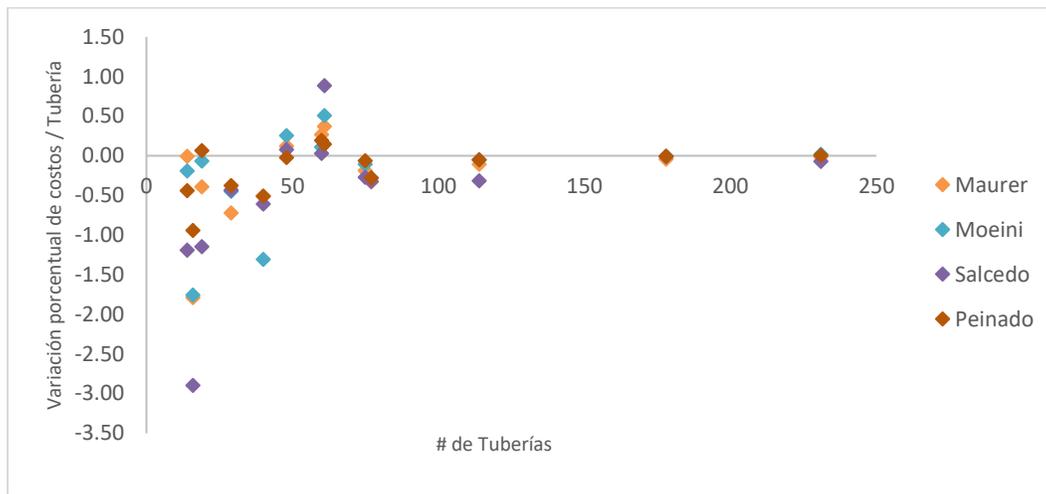


Gráfica 186. Relación entre variación porcentual de costos per cápita y # de habitantes.



Gráfica 187. Relación entre variación porcentual de costos por unidad de caudal y caudal de descarga

No se observa que haya una relación clara entre la variación porcentual de los costos de las redes y el caudal y la población, esto es así para todos los escenarios de optimización. Por otro lado se encontró que la variación porcentual por unidad de tuberías y la cantidad de tuberías total que conforman las redes.



6 CONCLUSIONES

- Dadas las características de las redes de alcantarillado sanitario, las cuales predominan en la base de datos, y las restricciones de diámetro mínimo establecido en la normativa colombiana, la ecuación propuesta por (Marchionni, Lopes, Mamouros, & Covas, 2014), se hace inválida pues el rango de diámetros donde puede ser aplicada se encuentra por encima de los comerciales disponibles y pertinentes para el tipo de redes que se maneja en esta investigación.
- La ecuación de Moeini resulta mucho más sensible a las condiciones de profundidad en la que se encuentren las tuberías.
- El criterio de recubrimiento mínimo es comúnmente incumplido por los diseños de la base de datos.
- Los parámetros hidráulicos que para efectos de esta investigación se llamaron restricciones hidráulicas, establecidos en el Título A del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS definidos como de obligatorio cumplimiento, no están siendo 100% garantizados.
- Dadas las características topográficas y demográficas de las zonas donde se construyen algunas RDUs las condiciones de diseño establecidas por la normativa a los diseñadores pueden considerarse no apropiadas.
- Teniendo en cuenta que un diseño optimizado representa una solución única, se puede afirmar el mal uso de la palabra “optimización” en diferentes títulos de los proyectos consultados.
- Los proyectos predominantes en la recolección de información que se realizó en esta investigación están fuera de zonas urbanas.
- Debido a la sensibilidad de la ecuación de Moeini y el comportamiento de las redes en cuanto a restricciones de excavación mínima, la comparación de precios productos de esta ecuación tienden a resistirse.
- Según la naturaleza y los objetivos de esta investigación, el diseño óptimo no implica siempre ser el de menor costo.
- No se puede seleccionar o establecer preferencia por una ecuación sobre otra debido a su naturaleza.
- En las redes pluviales se lograba mayor disminución de costos debido a la amplia lista de diámetros disponibles para realizar las iteraciones que dieran como resultado el diseño optimizado.
- En muchas redes de alcantarillado pluvial que se analizaron en este trabajo se encontraron diámetros que podrían haberse omitido en el diseño inicial pues solo una de las tuberías en toda la red lo poseía.

- Las ecuaciones de peinado y salcedo a pesar de estar en las mismas unidades de costo no se comportaron de la misma manera y en las mismas dimensiones debido a las particularidades en el planteamiento de cada una y además en las salvedades que se hicieron para ser utilizadas en este trabajo.
- El uso de ecuaciones de costo representa una buena aproximación para estimar la variabilidad de los costos de construcción de las redes bajo diferentes escenarios, pero esto no implica que representen el costo real de construcción de las mismas.
- Si el costo de las redes analizadas se evaluara por la cantidad de tuberías que tienen las redes, se tiene que entre más tuberías menor impacto en el beneficio porcentual respecto a la cantidad de inversión representaría para la población.
- Inicialmente las redes estudiadas no cumplían con los valores en sus parámetros hidráulicos de diseño y ajustar esto a lo establecido por la normativa significaba en muchos casos aumentar el costo.
- El ahorro total logrado con la optimización de los diseños es suficiente para financiar varias redes como las analizadas en esta investigación. Con base en esto se puede afirmar que de implementarse el diseño optimizado se podrían liberar recursos para el financiamiento de nuevos proyectos de RDUs en Colombia.
- No es posible identificar una relación clara entre el porcentaje de reducción de costos y las características de las redes analizadas tales como población, caudal de descarga.
- Aunque algunas de las redes pluviales poseían diámetros que habilitaban la ecuación de (Marchionni, Lopes, Mamouros, & Covas, 2014), no se utilizó con el fin de analizar todas las redes con las mismas ecuaciones, es decir, mantener los mismos escenarios comparativos.
- Aumentar el valor de la restricción mínima del esfuerzo cortante hace que aumente la profundidad de excavación, incluso hasta tal punto de sobrepasar el valor máximo de profundidad permitido.
- Es necesario potencializar y reconocer la importancia de la optimización en diseño de RDUs, esto debido a que tradicionalmente se tienen en cuenta como base de estos la experiencia de los diseñadores y los criterios permisibles de los parámetros hidráulicos, lo que muchas veces no es suficiente para obtener buenos diseños que no representen altas inversiones, y en muchos casos imposibles, para las comunidades.

7 RECOMENDACIONES

- En el documento de entrada a UTOPIA en la sección de manholes los dos últimos deben coincidir con el inicio y fin de la tubería conduce a la descarga.
- Para el cálculo de costos de RDUs con las ecuaciones mencionadas en el apartado 2.3 de este documento, se recomienda utilizar la ecuación propuesta por (Marchionni, Lopes, Mamouros, & Covas, 2014) para alcantarillados pluviales.
- Realizar una investigación de revisión del estado del arte de las normativas que regulan el diseño de RDUs en Colombia y alrededor del mundo con el fin de fortalecer lo establecido por el RAS.
- Estudiar la variación de los costos no solo con las modificaciones en el diseño hidráulico de las redes si no también con su topología.
- Adaptar los archivos de entrada a UTOPIA de manera que sean compatibles a los formatos que se manejan tradicionalmente en las memoras de cálculo de diseños de RDUs

8 REFERENCIAS

- Afshar, M. (2010). A parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: constrained and unconstrained approach. *Advances in Engineering Software*, 188-195.
- Afshar, M., Shahidi, M., Rohani, M., & Sargolzaei, M. (2011). Application of cellular automata to sewer network optimization problems. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering* 18, 304-3012.
- Aguilar, A. (2016). *EVALUACIÓN DE FUNCIONES OBJETIVO EN LA METODOLOGÍA EXHAUSTIVA DESARROLLADA POR EL CIACUA PARA EL DISEÑO OPTIMIZADO DE ALCANTARILLADOS*. Tesis de Pregrado: Universidad de Los Andes.
- Butler, D., & Davies, J. (2011). *Urban Drainage. Third Edition*. New York: Spon Press.
- DNP. (2007). *Documento CONPES 3463*. Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2013). *Evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985 - 2013)*. Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2018). *Bases para El Plan Nacional de Desarrollo 2018- 2022 "Pacto por Colombia, pacto por la equidad"*. Departamento Nacional de Planeación .
- Duque, N. (2013). *METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE TUBERÍAS EN SERIE EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO*. Tesis de Pregrado: Universidad de Los Andes.
- Duque, N., Duque, D., & Saldarriaga, J. (2016). A new methodology for the optimal design of series of pipes on sewer systems. *Journal of hydroinformatics*.
- Marchionni, V., Lopes, N., Mamouros, L., & Covas, D. (2014). *Modelling Sewer Systems Costs with Multiple Linear Regression*.
- Maurer, M., Wolfram, M., & Anja, H. (2010). Factors affecting economies of scale in combined sewer systems. *Water Science & Technology - WST*.
- Moeini, R., & Afshar, M. (2012). *Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants*.
- MVCT. (2016). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- MVCT. (2016). *Resolución 1063*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio .

-
- PAVCO. (2014). *Manual Técnico Tubosistemas para Alcantarillado NOVAFORT NOVALOC*.
- Peinado, C. (2016). *Ecuaciones de costo para el diseño optimizado de redes de agua potable y alcantarillado*. Tesis de Maestría Uniandes.
- Salcedo, C. (2012). *Diseño optimizado de sistemas de alcantarillado utilizando los conceptos de resiliencia y potencia unitaria*. Tesis de pregrado Uniandes.
- Suárez, A., & Cardona, I. (2009). *Análisis de los planes departamentales de agua*. Foro Nacional Ambiental.
- Yeh, S., Chu, C., Chan, Y., & Lin, M. (2013). Optimal Design of Sewer Network by Tabu Search and Simulated Annealing. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*.