

**PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA CIVIL**

**DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DRENAJE URBANO PARA CIUDADES
DE ALTA PENDIENTE**

**PRESENTADO POR:
MAURICIO PALACIOS PONCE**

**ASESOR:
JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA**
*Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería
Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2020**

Agradecimientos

A mi abuelo, *in memoriam*.

A mi madre, por siempre apoyarme y respaldarme en todas mis decisiones a lo largo de mi carrera y de mi vida.

A mi asesor, Juan Saldarriaga, por guiarme y prestarme sus conocimientos a lo largo de este proyecto.

A Cristian Cardona y Juana Herrán, por sacar de su tiempo para instruirme en el manejo de UTOPIA.

A mis amigos, Arturo, Jara, Junior y Valentina, por aconsejarme, apoyarme y animarme en toda la carrera y durante este proyecto.

A todos ustedes, gracias.



Contenido

1	Introducción	11
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo General	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	Marco Teórico	18
2.1	Redes de Drenaje Urbano	18
2.1.1	Componentes de las redes	18
2.1.2	Generalidades, supuestos y entendimiento de la hidráulica en los sistemas de alcantarillado	23
2.1.3	Velocidad del Flujo	27
2.2	Restricciones de Diseño	29
3	Metodología	30
3.1	Redes a utilizar	30
3.2	UTOPIA	31
3.2.1	Datos de entrada	32
3.2.2	Selección del trazado	34
3.2.3	Diseño Hidráulico	36
3.2.4	Función objetivo de Costos	40
3.3	Método de variación topográfica	45
3.4	Nomenclatura utilizada	47
3.5	Diámetros utilizados	48
4	Resultados	49
4.1	Red Miraflores	49
4.1.1	Terreno original – Red Miraflores	50
4.1.2	Terreno inclinado (2) – Red Miraflores	53
4.1.3	Terreno inclinado (4) – Red Miraflores	57
4.1.4	Terreno inclinado (6) – Red Miraflores	61
4.1.5	Terreno inclinado (12) – Red Miraflores	65



4.1.6 Resultados globales – Red Miraflores	69
4.1.7 Diámetros obtenidos – Red Miraflores.....	72
4.2 Red Chicó Sur	73
4.2.1 Terreno original – Red Chicó Sur	75
4.2.2 Terreno inclinado (2) – Red Chicó Sur	79
4.2.3 Terreno inclinado (4) – Red Chicó Sur	83
4.2.4 Terreno inclinado (6) – Red Chicó Sur	87
4.2.5 Terreno inclinado (12) – Red Chicó Sur	90
4.2.6 Terreno inclinado (18) – Red Chicó Sur	95
4.2.7 Resultados globales – Red Chicó Sur.....	99
4.2.8 Diámetros obtenidos – Red Chicó Sur	103
4.3 Red Patrón de Li y Matthew.....	103
4.3.1 Terreno original – Red Patrón de Li y Matthew.....	104
4.3.2 Terreno inclinado (100) – Red Patrón de Li y Matthew.....	107
4.3.3 Terreno inclinado (200) – Red Patrón de Li y Matthew.....	111
4.3.4 Terreno inclinado (300) – Red Patrón de Li y Matthew.....	114
4.3.5 Resultados globales – Red Patrón de Li y Matthew	117
4.3.6 Diámetros obtenidos – Red Patrón de Li y Matthew.....	120
4.4 Red Patrón de Mays y Wenzel	121
4.4.1 Terreno x3 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	122
4.4.2 Terreno x4 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	125
4.4.3 Terreno x4.5 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	127
4.4.4 Terreno x5 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	129
4.4.5 Terreno x6 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	132
4.4.6 Terreno x9 – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	136
4.4.7 Resultados globales – Red Patrón de Mays y Wenzel.....	140
4.4.8 Diámetros obtenidos – Red Patrón de Mays y Wenzel	144
5 Análisis de Resultados.....	144
6 Conclusiones y recomendaciones	147



7	Referencias	149
8	Anexos	150

Índice de Figuras

Figura 1.	Pre - Urbanización. Tomado de Butler y Davies (2011).....	11
Figura 2.	Pos - urbanización. Tomado de Butler y Davies (2011).	12
Figura 3.	Territorio Colombiano	14
Figura 4.	Momento Inicial en el trazado de la red.....	16
Figura 5.	Uso de cámaras de caída en el trazado.....	16
Figura 6.	Trazado de la red.....	17
Figura 7.	Canaletas y bajantes. Tomando de Butler y Davies (2011).	19
Figura 8.	Captación de aguas residuales en una casa de dos plantas. Tomando de Butler y Davies (2011).	20
Figura 9.	Ejemplo de cámara de caída. Tomado de RAS (2016).	21
Figura 10.	Ejemplo 2 de cámara de caída. Tomado de Butler & Davies (2011).	22
Figura 11.	Flujo Uniforme en Canales abiertos. Tomado de Duque (2015).	25
Figura 12.	Propiedades geométricas de la tubería. Tomado de Saldarriaga (2020).	25
Figura 13.	Configuración del archivo de texto. Tomado del CIACUA (2020).....	32
Figura 14.	Trazado - Diseño hidráulico. Tomado de Duque (2015)	37
Figura 15.	Árbol - Diseño hidráulico. Tomado de Duque (2015)	38
Figura 16.	Grafo auxiliar. Tomado de Duque (2015).....	39

Índice de Gráficas

Gráfica 1.	Ajuste exponencial costo de cámaras. Tomado de Marú (2018).....	43
Gráfica 2.	Ajuste lineal costo de cámaras. Tomado de Marú (2018)	43
Gráfica 3.	Ajuste potencial costo de cámaras. Tomado de Marú (2018)	44
Gráfica 4.	Red Miraflores - Modelada en Xpress.....	49
Gráfica 5.	Red Miraflores.....	50
Gráfica 6.	Terreno original - Red Miraflores: Topografía.....	51
Gráfica 7.	Terreno original - Red Miraflores: Topografía 3D.....	52
Gráfica 8.	Terreno inclinado (2) - Red Miraflores: Topografía	54
Gráfica 9.	Terreno inclinado (2) - Red Miraflores: Topografía 3D.....	55
Gráfica 10.	Ruta Cámaras: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores.....	57
Gráfica 11.	Terreno inclinado (4) - Red Miraflores: Topografía	58
Gráfica 12.	Terreno inclinado (4) - Red Miraflores: Topografía 3D.....	59



Gráfica 13. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores.....	61
Gráfica 14. Terreno inclinado (6) - Red Miraflores: Topografía	62
Gráfica 15. Terreno inclinado (6) - Red Miraflores: Topografía 3D.....	63
Gráfica 16. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores.....	65
Gráfica 17. Terreno inclinado (12) - Red Miraflores: Topografía	66
Gráfica 18. Terreno inclinado (12) - Red Miraflores: Topografía 3D.....	67
Gráfica 19. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores.....	69
Gráfica 20. Longitud de la red - Red Miraflores	70
Gráfica 21. Costo total - Red Miraflores	70
Gráfica 22. Diferencia de nivel - Red Miraflores.....	71
Gráfica 23. Velocidad en las tuberías - Red Miraflores	71
Gráfica 24. Pendiente de las tuberías - Red Miraflores.....	72
Gráfica 25. Red Chicó Sur - Modelada en Xpress	73
Gráfica 26. Red Chicó Sur	74
Gráfica 27. RML - Chicó Sur.....	74
Gráfica 28. Terreno original - Red Chicó Sur: Topografía	75
Gráfica 29. Terreno original - Red Chicó Sur: Topografía 3D	76
Gráfica 30. RML: Terreno original - Red Chicó Sur	78
Gráfica 31. Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur: Topografía	79
Gráfica 32. Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur: Topografía 3D	80
Gráfica 33. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur	82
Gráfica 34. Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur: Topografía	83
Gráfica 35. Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur: Topografía 3D	84
Gráfica 36. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur	86
Gráfica 37. Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur: Topografía	87
Gráfica 38. Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur: Topografía 3D	88
Gráfica 39. RML: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur	90
Gráfica 40. Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur: Topografía	91
Gráfica 41. Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur: Topografía 3D	92
Gráfica 42. RML: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur	94
Gráfica 43. Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur: Topografía	95
Gráfica 44. Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur: Topografía 3D	96
Gráfica 45. RML: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur	98
Gráfica 46. Longitud de la red - Red Chicó Sur.....	100
Gráfica 47. Costo total - Red Chicó Sur.....	100
Gráfica 48. Diferencia de nivel - Red Chicó Sur.....	101
Gráfica 49. Velocidad en las tuberías - Red Chicó Sur.....	101
Gráfica 50. Pendiente de las tuberías - Red Chicó Sur.....	102



Gráfica 51. Red Patrón Li y Matthew - Modelada en Xpress	104
Gráfica 52. Red Patrón Li y Matthew	104
Gráfica 53. Terreno original - Red patrón Li y Matthew: Topografía.....	105
Gráfica 54. RMB: Terreno original - Red patrón Li y Matthew	107
Gráfica 55. Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew: Topografía	108
Gráfica 56. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew - Nodos: 12 – 21.....	110
Gráfica 57. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew - Nodos: 73 – 80.....	111
Gráfica 58. Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew: Topografía	112
Gráfica 59. RMB: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew	114
Gráfica 60. Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew: Topografía	115
Gráfica 61. RMB: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew	117
Gráfica 62. Longitud de la red - Red patrón Li y Matthew	118
Gráfica 63. Costo total - Red patrón Li y Matthew	118
Gráfica 64. Diferencia de nivel - Red patrón Li y Matthew.....	119
Gráfica 65. Velocidad en las tuberías - Red patrón Li y Matthew	119
Gráfica 66. Pendiente de las tuberías - Red patrón Li y Matthew.....	120
Gráfica 67. Red patrón de Mays y Wenzel - Modelada en Xpress.....	121
Gráfica 68. Red patrón de Mays y Wenzel.....	122
Gráfica 69. Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	123
Gráfica 70. Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	124
Gráfica 71. Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	125
Gráfica 72. Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	126
Gráfica 73. Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	127
Gráfica 74. Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	128
Gráfica 75. Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	129
Gráfica 76. Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	130
Gráfica 77. Ruta Cámaras: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel.....	132
Gráfica 78. Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	133
Gráfica 79. Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	134
Gráfica 80. Ruta Cámaras: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel.....	136
Gráfica 81. Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía.....	137
Gráfica 82. Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D.....	138
Gráfica 83. Ruta Cámaras: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel.....	140
Gráfica 84. Longitud de la red - Red patrón Mays y Wenzel.....	141
Gráfica 85. Costo total - Red patrón Mays y Wenzel.....	142
Gráfica 86. Diferencia de nivel - Red patrón Mays y Wenzel.....	142
Gráfica 87. Velocidad en las tuberías - Red patrón Mays y Wenzel.....	143
Gráfica 88. Pendiente de las tuberías - Red patrón Mays y Wenzel.....	143



Gráfica 89. Diámetros menores - Red Miraflores	146
Gráfica 90. Diámetros medianos - Red Miraflores.....	146
Gráfica 91. Diámetros mayores - Red Miraflores	147

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de Flujo.....	24
Tabla 2. Ejemplo del archivo de texto - Parte 1 - Red Chicó Sur	33
Tabla 3. Ejemplo del archivo de texto - Parte 2 - Red Chicó Sur	33
Tabla 4. Constantes utilizadas en la ecuación de Maurer.....	42
Tabla 5. Coeficientes de ajuste obtenidos por Marú (2018).....	44
Tabla 6. Lista de diámetros comerciales	48
Tabla 7. Clasificación de diámetros	48
Tabla 8. Resultados: Terreno original - Red Miraflores.....	52
Tabla 9 Resultados: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores.....	55
Tabla 10. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores.....	56
Tabla 11. Resultados: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores.....	59
Tabla 12. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores.....	60
Tabla 13. Resultados: Terreno inclinado (6) - Red Miraflores.....	63
Tabla 14. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (6) - Red Miraflores.....	64
Tabla 15. Resultados: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores.....	67
Tabla 16. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores.....	68
Tabla 17. Profundidad máxima - Red Miraflores.....	69
Tabla 18. Costos - Red Miraflores	72
Tabla 19. Diámetros obtenidos - Red Miraflores	73
Tabla 20. Resultados: Terreno original - Red Chicó Sur	76
Tabla 21. RML: Terreno original - Red Chicó Sur	77
Tabla 22. Terreno original - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur.....	78
Tabla 23. Resultados: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur	80
Tabla 24. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur	81
Tabla 25. Terreno inclinado (2) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur.....	82
Tabla 26. Resultados: Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur	84
Tabla 27. RML: Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur	85
Tabla 28. Terreno inclinado (4) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur.....	86
Tabla 29. Resultados: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur	88
Tabla 30. RML: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur	89
Tabla 31. Terreno inclinado (6) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur.....	90
Tabla 32. Resultados: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur	92



Tabla 33. RML: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur	93
Tabla 34. Terreno inclinado (12) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur	94
Tabla 35. Resultados: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur	96
Tabla 36. RML: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur	97
Tabla 37. Terreno inclinado (18) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur	98
Tabla 38. Profundidad máxima - Red Chicó Sur	99
Tabla 39. Costos - Red Chicó Sur	102
Tabla 40. Diámetros obtenidos - Red Chicó Sur	103
Tabla 41. Resultados: Terreno original - Red patrón Li y Matthew	105
Tabla 42. RMB: Terreno original - Red patrón Li y Matthew	106
Tabla 43. Resultados: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew	108
Tabla 44. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew	109
Tabla 45. Resultados: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew	112
Tabla 46. RMB: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew	113
Tabla 47. Resultados: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew	115
Tabla 48. RMB: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew	116
Tabla 49. Profundidad máxima - Red patrón Li y Matthew	117
Tabla 50. Costos - Red patrón Li y Matthew	120
Tabla 51. Diámetros obtenidos - Red Patrón Li y Matthew	120
Tabla 52. Resultados: Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel	124
Tabla 53. Resultados: Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel	126
Tabla 54. Resultados: Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel	128
Tabla 55. Resultados: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel	130
Tabla 56. Ruta Cámaras: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel	131
Tabla 57. Conexiones a la cámara de caída - Terreno X5 - Red patrón Mays y Wenzel	132
Tabla 58. Resultados: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel	134
Tabla 59. Ruta Cámaras: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel	135
Tabla 60. Conexiones a la cámara de caída - Terreno X6 - Red patrón Mays y Wenzel	136
Tabla 61. Resultados: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel	138
Tabla 62. Ruta Cámaras: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel	139
Tabla 63. Conexiones a las cámaras de caída - Terreno X9 - Red patrón Mays y Wenzel	140
Tabla 64. Profundidad máxima - Red patrón Mays y Wenzel	141
Tabla 65. Costos - Red patrón Mays y Wenzel	144
Tabla 66. Diámetros obtenidos - Red patrón Mays y Wenzel	144
Tabla 67. Caudal y coordenadas de la red Miraflores	150
Tabla 68. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red Miraflores	151
Tabla 69. Caudal y coordenadas de la red Chicó Sur	153
Tabla 70. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red Chicó Sur	156



Tabla 71. Caudal y coordenadas de la red patrón Li y Matthew	159
Tabla 72. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red patrón Li y Matthew	161
Tabla 73. Caudal y coordenadas de la red patrón Mays y Wenzel con la pendiente aumentada 3 veces	164
Tabla 74. Elevaciones obtenidas manualmente para aumentar la pendiente 4, 4.5, 5, 6 y 9 veces - Red patrón Mays y Wenzel.....	165

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Paralelismo en las pendientes	24
Ecuación 2. Ángulo de llenado de la tubería	26
Ecuación 3. Área mojada.....	26
Ecuación 4. Perímetro mojado	26
Ecuación 5. Radio hidráulico	26
Ecuación 6. Ancho superficial.....	26
Ecuación 7. Diámetro mojado	27
Ecuación 8. Número de Froude	27
Ecuación 9. Esfuerzo cortante	27
Ecuación 10. Velocidad de Manning.....	27
Ecuación 11. Velocidad de Chezy.....	28
Ecuación 12. Velocidad explícita	28
Ecuación 13. Pérdidas por fricción. Darcy - Weisbach.....	28
Ecuación 14. Factor de Fricción. Colebrook - White	29
Ecuación 15. Costos de Maurer.....	40
Ecuación 16. Costos en función de la profundidad de la tubería	40
Ecuación 17. Costos en función del diámetro y cobertura de la tubería.....	40
Ecuación 18. Función de costos de Maurer extendida	41
Ecuación 19. Función de costos de Maurer para toda la red	41
Ecuación 20. Ecuación de costos para las cámaras de caída de Peinado (2014).....	42
Ecuación 21. Ecuación de costos utilizada para las cámaras de caída	44
Ecuación 22. Ecuación de costos final	45
Ecuación 23. Tasa de variación lineal - Metodología de Noriega (2020)	46
Ecuación 24. Nueva cota para el pozo i - Metodología de Noriega (2020).....	46
Ecuación 25. Nueva cota para el pozo i con un paso n	46



1 Introducción

Desde que las personas empezaron a agruparse y vivir en ciudades el manejo del agua se convirtió en un tema de vital importancia, tanto por la extracción y subsecuente uso de la misma como las consideraciones adicionales que trae el recubrimiento del suelo con material impermeable. Lo anterior hizo indispensable pensar en un sistema que manejara estos dos tipos de agua: la llamada agua residual, que vendría siendo el agua remanente por la utilización humana, y el agua lluvia, que al caer en un suelo impermeable (como se había mencionado antes) esta no puede ser evacuada de la ciudad por los medios naturales del ciclo del agua, a dicho sistema se le conoce hoy en día como drenaje (Butler , Davies, 2011).

Profundizando acerca del recubrimiento del suelo con material impermeable es importante ilustrar el comportamiento del agua pluvial antes y después de la impermeabilización:

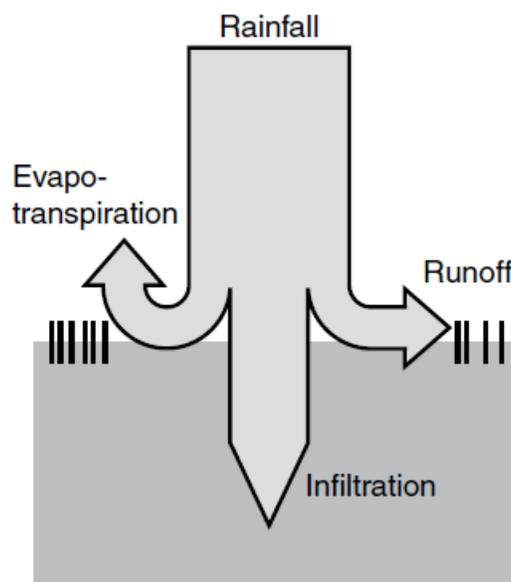


Figura 1. Pre - Urbanización. Tomado de Butler y Davies (2011).

Antes de que el suelo sea cubierto con material impermeable el agua pluvial sigue un comportamiento como el descrito en la [Figura 1](#), en la cual se hace claro que el agua en momento de entrar en contacto con la superficie tiene tres destinos posibles: ser evapotranspirada, infiltrarse en subsuelo o fluir como escurrimiento; nótese también en la figura las proporciones existentes entre estos tres destinos.

Por otro lado, cuando el suelo se ve cubierto por culpa de la urbanización se tiene:

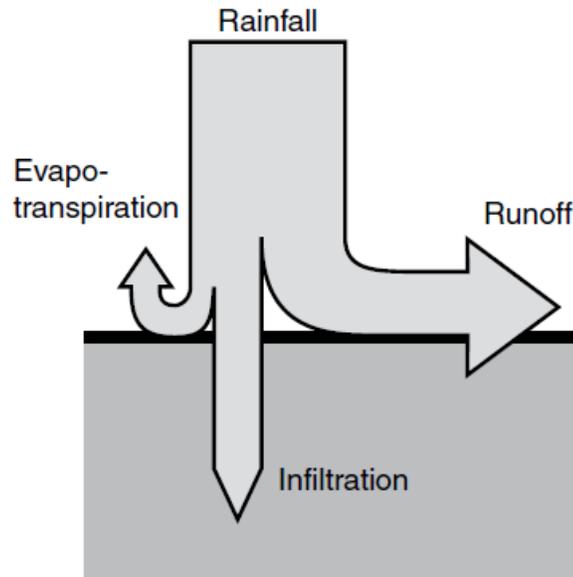


Figura 2. Pos - urbanización. Tomado de Butler y Davies (2011).

Como se puede apreciar en la **Figura 2. Pos - urbanización. Tomado de Butler y Davies (2011)**. El cambio con respecto a la figura anterior es notorio, pues, aunque sigan existiendo los tres destinos posibles (evapotranspiración, infiltración y escorrentía) las proporciones han cambiado drásticamente, haciendo que el volumen de agua que se tenga por concepto de escorrentía sea muy elevado. Es por lo anterior que el recubrimiento del suelo ha hecho aún más necesarios los sistemas de alcantarillado.

Continuando con los sistemas de drenaje estos han ido evolucionando a través del tiempo, por ejemplo, los romanos consideraban que la mejor manera de lidiar con el agua residual y el agua lluvia era evacuando estas por fuera de la ciudad con la mayor rapidez y efectividad posible para así proteger a los habitantes de la interacción con estas (Saldarriaga, 2020), sin embargo, con el incremento de población y el crecimiento de la conciencia ambiental la evacuación rápida de las aguas de drenaje se volvió algo más complejo de lograr y, a su vez, se estableció que esta manera no era la correcta en términos ambientales por la clara contaminación que ocurría en los cuerpos de agua receptores. A su vez, y partiendo de lo previamente mencionado, el enfoque moderno que se le ha dado al sistema de drenaje es no verlo exclusivamente como una red de alcantarillado sino como un sistema integrado de tres componentes claves: el alcantarillado, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el cuerpo de agua receptor (Saldarriaga, 2020).



Cabe resaltar la importancia de las relaciones existentes entre un sistema de drenaje, la población y el medio ambiente. Por un lado, y considerando que el sistema de drenaje funcione sin ninguna falla u alteración este tendrá un rol de receptor, recibiendo por parte de la población las aguas residuales y, por parte del medio ambiente, recibirá las aguas lluvias. Sin embargo, si el sistema de drenaje presenta fallas significativas las relaciones cambiarían su sentido, ocasionando así que los receptores sean los habitantes y su entorno. Lo anterior se ve reflejado, por mencionar un ejemplo, cuando ocurren inundaciones, que, cabe mencionar, son muy frecuentes en ciudades complejas y con un mal diseño hidráulico como lo es la ciudad de Bogotá. Dichas inundaciones, que son dadas por un tiempo de lluvia con un periodo de retorno fuera del umbral de diseño, afectan a la población interrumpiendo el orden de su vida diaria, a la par que generan problemas de contaminación y salud pública (pensando en el hecho que el agua de drenaje salga a la superficie y logre entrar en contacto con las personas). Por otro lado, es importante destacar que un sistema de drenaje que no funcione óptimamente en términos de diseño, podría desencadenar un problema de contaminación ambiental al no redirigir correctamente las aguas de drenaje y ocasionar que estas entren en contacto con uno o más cuerpos de agua con los que la ciudad tenga relación o cercanía. Sin embargo y aún con toda la importancia que tienen las redes de drenaje en la ciudad moderna estas han sido relegadas de la atención; atención que, cabe resaltar, si han recibido las redes de distribución de agua potable, redes que son considerablemente menos costosas que las redes de drenaje urbano y, por consecuencia de esta falta de atención, su diseño se ha visto perpetuado como algo precario y anticuado, creando así un paradigma tangible dentro de la ingeniería civil. Dicho paradigma da como resultado que no se realice un estudio detallado para llegar al diseño óptimo, sino que este es “inventado” y, con prueba y error, se establece un diseño final que es, ultimadamente, implementado en la ciudad.

Continuando con lo anterior, pocos han sido los esfuerzos de la ingeniería hidráulica en avanzar en el campo del diseño optimizado de redes de drenaje urbano, es decir, en encontrar metodologías que faciliten el hallar un diseño de red con el menor costo posible, que sea hidráulicamente funcional, que satisfaga las necesidades de la población y que sean resilientes (esto último hace referencia a la capacidad de poder adaptarse al sufrir un daño o irregularidad y seguir cumpliendo con su función hasta que el inconveniente sea reparado). En dichos esfuerzos la Universidad de los Andes ha tomado la delantera en el panorama nacional e internacional por medio del desarrollo del programa UTOPIA (Underground Topography for Optimal Pipeline Infrastructure Assessment), programa que nació de la tesis de maestría de Natalia Duque (2015) titulada “Metodología para el diseño de redes de alcantarillado” y ha sido mejorado gracias al trabajo de más tesisistas como lo son Andrés



Aguilar, Jesús Zambrano, Andrea Marú, entre otros. Dicho programa es definido como un software creado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (llamado CIACUA por sus siglas en español) que tiene la capacidad de encontrar el diseño más óptimo de una red de drenaje urbano resolviendo el enigma primero por la selección del trazado y, posteriormente, en el diseño hidráulico requiriendo únicamente como parámetros de entrada las coordenadas en las tres dimensiones de los pozos que alimentan el sistema y el caudal proveniente de ellos (CIACUA, 2020). Ahora bien, el avance de toda área de la ingeniería debe representar una mejoría en la calidad de vida de las personas, es por lo tanto necesario encontrar situaciones adicionales del contexto colombiano en las cuales, aplicando la metodología de UTOPIA, se logre desarrollar conocimientos que repercutan de manera positiva a los ciudadanos. Para identificar uno de estos contextos es necesario simplemente observar el territorio colombiano:



Figura 3. Territorio Colombiano

De esta manera recordamos como el terreno colombiano es atravesado por las tres cordilleras andinas (occidental, central y oriental) haciéndonos ver claramente una situación particularmente poco estudiada: el drenaje en las ciudades montañosas.



Recapitulando, cabe resaltar algunos aspectos del porqué es importante realizar este estudio en un país como Colombia: primeramente, como resulta evidente hay una gran cantidad de ciudades en territorio montañoso, hecho que obtiene gran relevancia cuando se observa que entre dichas ciudades están capitales famosas como Bogotá (capital del país), Medellín, Manizales, Pereira y Bucaramanga (dicha lista también cuenta con Tunja, Ibagué, Armenia, Popayán y Pasto) que son ciudades donde es imperativo contar con un sistema de drenaje óptimo al ser grandes centros cívicos. Segundo, aunque generalmente al dar un vistazo superficial se podría pensar que los sistemas drenajes realizados en ciudades de alta pendiente son más sencillos debido a que una ciudad de este estilo se drenaría por la mera acción de la gravedad (supuesto que no tiene en cuenta la acción altamente contaminante del *first flush*) estos diseños tienden a ser un tanto complejos por la adición de las llamadas cámaras de caídas, cámaras que podrían ser definidas como estructuras construidas para facilitar el curso continuo del flujo cuando una tubería está cerca de llegar al límite permitido por el RAS. Tercero, un diseño óptimo trae consigo un ahorro de dinero que puede llegar a ser bastante considerable y, por ende, representar un mejor uso del erario público. Por último, este tipo de estudios favorecen a enaltecer la ingeniería y capacidad investigativa del pueblo colombiano, en especial de la Universidad de los Andes, pues de ella ha salido la iniciativa que ha dado como fruto el único programa en el mundo para el diseño optimizado de redes de drenaje.

Habiendo aclarado la importancia de realizar un estudio acerca del diseño optimizado de redes drenaje urbano para ciudades de alta pendiente, es importante ahora recalcar el anteriormente mencionado límite del RAS. Dicho límite establece que las tuberías correspondientes a drenaje urbano deben estar enterradas a una profundidad no menor de 1.2 metros; este límite en situaciones de estar en un terreno plano o muy levemente inclinado no tiene mayor repercusión en el diseño debido a que la tubería puede mantenerse constante a través de grandes extensiones de terreno sin requerir de cámaras de caída para completar el trazado. Por otro lado, en terrenos inclinados este límite hace que se eleven los costos al no poder extender un poco más las tuberías de manera que se logre “ganar” terreno.

Por otro lado, en orden de darle más claridad al lector de lo que es un diseño de una red de drenaje en una ciudad montañoso se presenta a continuación una breve ilustración:

Momento inicial:

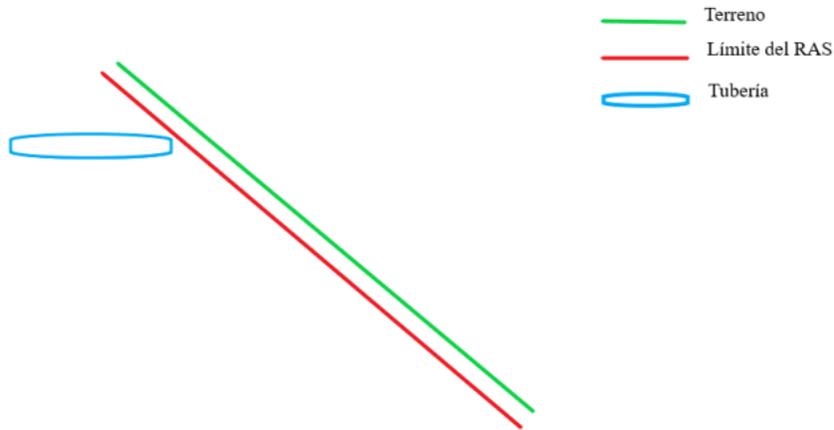


Figura 4. Momento Inicial en el trazado de la red

El primer momento o momento inicial es cuando la tubería se extiende de manera recta a lo largo del terreno hasta que, por efecto de la inclinación, se encuentra con el límite del RAS y se ve obligada a realizar un cambio de dirección con el cual poder seguir avanzando hasta completar la totalidad del trazado. Es al finalizar este momento que entra en juego la estructura antes mencionada: cámara de caída.

Uso de Cámaras:

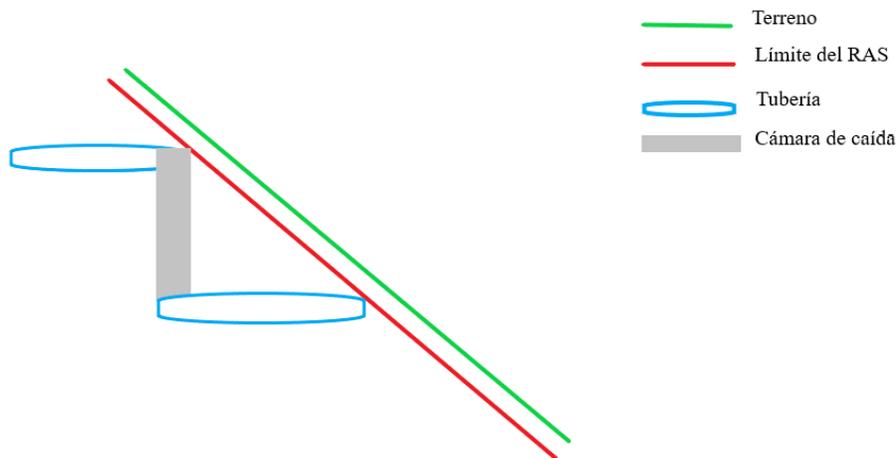


Figura 5. Uso de cámaras de caída en el trazado



El trazado al verse restringido por el límite de profundidad del RAS se ve forzado a implementar las cámaras de caída, esto trae algunas consideraciones adicionales. Primero, los costos de construcción que son añadidos por cada una de estas cámaras, costos que, al considerar el trazado en toda su extensión y visualizarlo en las tres dimensiones, puede llegar a tener un valor considerablemente alto, por ende, un diseño lo suficientemente optimizado puede llegar a ser decisivo al momento de realizar o no un alcantarillado. Por otro lado, el hecho de que estas cámaras sean construidas en condiciones de pendiente elevada trae un problema hidráulico: el flujo supercrítico aparece con gran facilidad, flujo que, por sus condiciones turbulentas y de gran velocidad, puede ocasionar daños a la estructura de la cámara. Es por lo anterior que el diseño de estas cámaras requiere de un gran detalle, porque en toda construcción de alcantarillado está la regla implícita: con flujo supercrítico no se construyen cámaras de caída.

Resto del trazado:

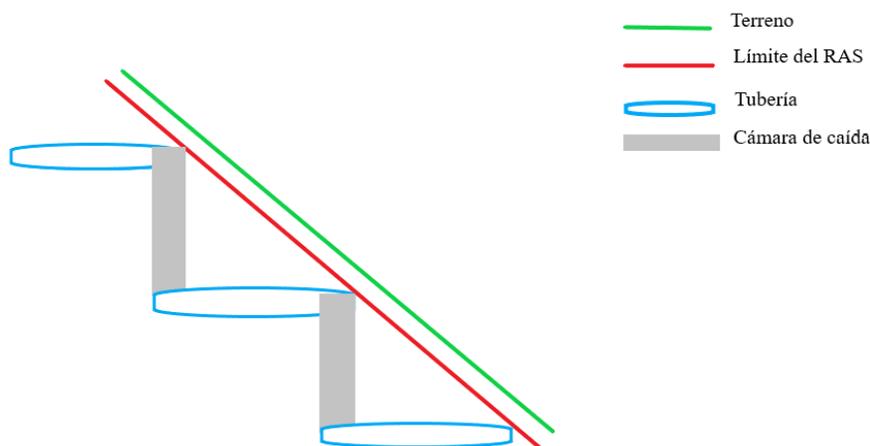


Figura 6. Trazado de la red

En el resto del trazado lo que ocurre es una repetición de los dos momentos anteriores, donde una tubería entra en contacto con el límite, se construye una cámara de caída y se continúa con otra tubería, tal como lo muestra la **Figura 6. Trazado de la red**.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Estudiar los efectos del aumento de inclinación en el diseño optimizado de redes de drenaje urbano utilizando la metodología propuesta por Duque (2015), con las modificaciones que permiten la creación de cámaras de caída en el trazado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar de manera óptima tanto redes de drenaje urbano existentes como redes patrón expuestas en artículos científicos.
- Modificar la topografía del terreno en el cual se va a diseñar utilizando la metodología expuesta por Noriega (2020).
- Estudiar la aparición e incremento de las cámaras de caída en redes de drenaje urbano a medida que exista un aumento en la inclinación del terreno.
- Analizar el cambio en la profundidad máxima obtenida en los distintos diseños realizados.
- Analizar el cambio de parámetros tales como velocidad, pendiente, costo, etc. en una red de drenaje urbano cuando la inclinación del terreno es aumentada.

2 Marco Teórico

2.1 Redes de Drenaje Urbano

Las redes de drenaje urbano, comúnmente llamadas redes de alcantarillado, son las encargadas de recolectar y transportar las aguas residuales y las aguas lluvias para así proteger a las personas de una posible interacción con estas. De la misma manera, es importante recalcar que las redes de drenaje urbano son sistemas complejos, con diversos componentes que van más allá de simples tuberías y con una hidráulica distinta a lo que comúnmente se tiene en redes de agua potable. En este capítulo se profundizará más acerca de las redes de drenaje urbano.

2.1.1 Componentes de las redes

Los componentes que conforman el sistema de alcantarillado se encargan tanto de la recolección como del transporte de las aguas residuales y pluviales. A su vez, dichos componentes podrían clasificarse en cinco grupos (Saldarriaga, 2020):

- Captación
- Conducción
- Inspección y Conexión
- Regulación y alivio
- Bombeo



Captación

En la captación lo primordial para la recolección del agua pluvial es el área superficial, sin embargo, debido a la impermeabilización del suelo es necesario el uso de otras estructuras:

- Sumideros: estructurar para la recolección de escorrentía superficial diseñadas en forma lateral o transversal al sentido del flujo, generalmente localizadas en vías vehiculares. Se debe tener en cuenta para su localización (RAS, 2016):
 1. Puntos bajos o de depresión.
 2. Donde haya una reducción de pendiente en las calles
 3. Antes de puentes y terraplenes
 4. Antes de cruces de calles y pasos peatonales

Se debe tener especial cuidado con la captación de sedimentos.

- Canaletas y bajantes: estructuras que ayudan a transportar el agua pluvial desde los techos de las casas hasta las calles donde es recolectada por los sumideros.

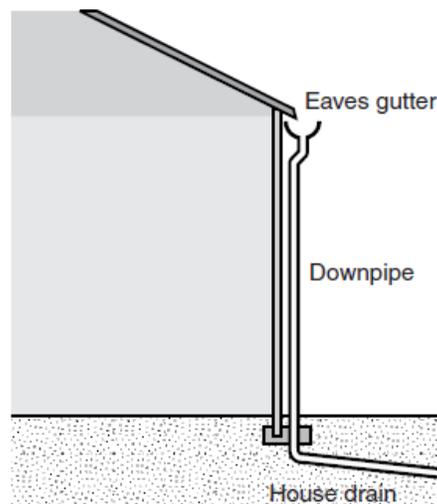


Figura 7. Canaletas y bajantes. Tomando de Butler y Davies (2011).

Lo anterior se aplica para el agua pluvial, el agua residual es captada directamente, sin importar si es de origen doméstico o no doméstico (Duque, 2015).



- Cámaras de caída: estas estructuras son necesarias cuando todos los tramos de la tubería no pueden llegar a un mismo nivel a la cámara de inspección (con la condición de que esta diferencia de nivel sea mayor a 0,75 m). Por otro lado, estas cámaras tienen la función de (RAS, 2016):
 1. Dirigir el flujo.
 2. Disipar una cantidad considerable energía.
 3. Proteger la estructura contra impactos en las paredes causadas por el chorro.

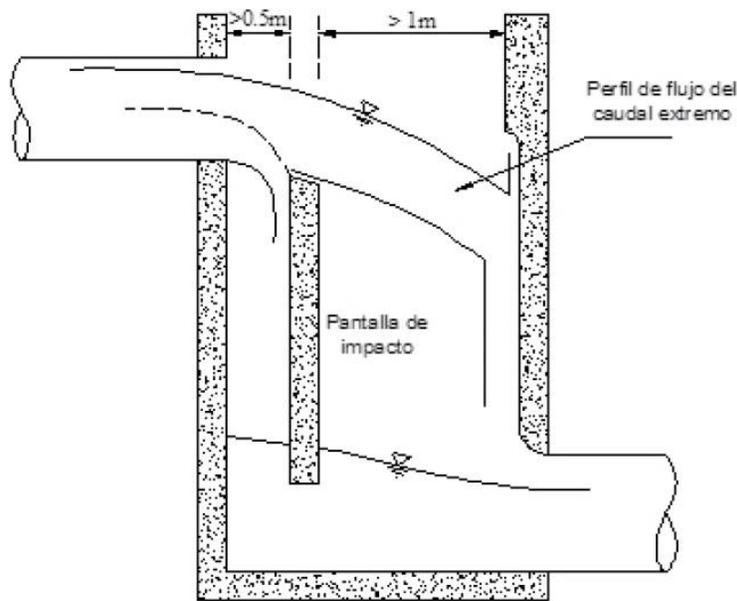


Figura 9. Ejemplo de cámara de caída. Tomado de RAS (2016).

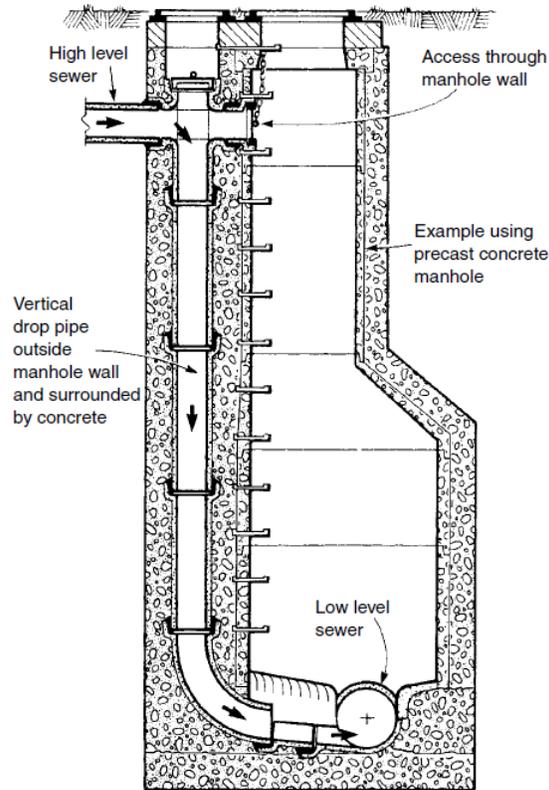


Figura 10. Ejemplo 2 de cámara de caída. Tomado de Butler & Davies (2011).

Regulación y Alivio

Las estructuras de regulación y alivio son:

- Aliviaderos: estructuras que tienen como fin disminuir los costos de conducción de aguas residuales y aguas lluvias hasta el final del trazado, sea este una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) o el cuerpo de agua receptor (RAS, 2016).
- Sistemas de almacenamiento temporal: estructuras recomendadas para sistemas de alta o media – alta complejidad, donde se recomienda almacenar un determinado volumen de agua durante el *first flush* (RAS, 2016). Lo anterior con el fin de disminuir el pico de caudal, pico que está correlacionado con el pico de contaminación. Por otro lado, el tiempo de retención no debe de ser muy prolongado porque puede derivar a malos olores (Duque, 2015).



- Sifones Invertidos: serie de conductos colocados en forma de “U” que son conectados por medio de una cámara al inicio del sifón (que cuenta con un vertedero) y otra cámara al final (RAS, 2016). Estas estructuras trabajan como tuberías a presión y son necesarios cuando se requiere a travesar un cuerpo de agua o para no interferir con la infraestructura de demás servicios públicos (Duque, 2015).
- Canales abiertos: estructuras utilizadas para el manejo de la escorrentía generada por lluvias (RAS, 2016), cuyo diseño está enfocado en manejar unas velocidades mínimas de tal manera que se evite la sedimentación de sólidos y, por otro lado, controlar que las velocidades máximas no causen daño a la estructura por erosión (Duque, 2015).
- Estructuras de disipación de energía: cumplen la función de entregar los caudales de aliviaderos, caudales de agua lluvia y más a los canales de drenaje natural y cuerpos de aguas receptores, en condiciones de energía tales que el riesgo de socavación o el riesgo por erosión se vean minimizados (RAS, 2016).

Bombeo

Los componentes de bombeo son requeridos cuando no haya suficiente energía en el sistema como para hacer que las aguas de drenaje fluyan por medio de la gravedad (Duque, 2015). Sin embargo, debido a que las estaciones de bombeo elevan los costos de construcción se deben realizar estudios previos que confirmen que no hay mejor alternativa que el uso de estas o, también, que no sea recomendable el flujo por gravedad (RAS, 2016).

2.1.2 Generalidades, supuestos y entendimiento de la hidráulica en los sistemas de alcantarillado

El primer paso para diseñar es suponer el tipo de flujo que mejor se apegue a la hidráulica, dicho de otra manera, suponer de qué manera se va a comportar el flujo tanto en el tiempo como en el espacio. Por otro lado, el fluido a trabajar es el agua entonces se puede suponer inicialmente que es un fluido incompresible; suposición que implica que su densidad es constante.

Siguiendo con la suposición del tipo de flujo, estos se clasifican de acuerdo a como este varía tanto en el tiempo como en el espacio. Las variaciones en el tiempo son clasificadas como



permanente o no permanente, mientras que las variaciones en el espacio son clasificadas como uniforme o variable. Con esto se tienen 4 tipos de flujo:

Tabla 1. Tipos de Flujo

Espacio Tiempo	Flujo Permanente	Flujo No Permanente
Flujo Uniforme	Flujo Uniforme	Flujo Uniforme No permanente
Flujo Variable	Flujo Variado Permanente	Flujo Variado No permanente

Algunas aclaraciones:

- El flujo variado permanente se divide en dos: flujo rápidamente variado y flujo gradualmente variado.
- El flujo uniforme No permanente no existe.

Para el alcantarillado se considera que flujo es uniforme.

Siguiendo con lo anterior, el tipo de flujo presente en el alcantarillado es debido a la condición de equilibrio presente entre las fuerzas gravitacionales, de presión y las fuerzas viscosas, donde las gravitacionales aceleran el flujo y las viscosas se oponen a este movimiento. Por otro lado, en este tipo de flujo (y usando para su análisis dos puntos en un canal abierto) se tiene que las propiedades hidráulicas de permanecen constantes, por ende, se logra ver una igualdad (paralelismo) en todas las pendientes existentes del canal (Duque, 2015):

- $S_f \rightarrow$ Línea de Energía Total (LET)
- $S_w \rightarrow$ Línea de Gradiente Hidráulico (LGH)
- $S_o \rightarrow$ Fondo del canal

$$S_f = S_w = S_o$$

Ecuación 1. Paralelismo en las pendientes

Lo anterior implica que las pérdidas por fricción sean constantes a lo largo de la tubería.

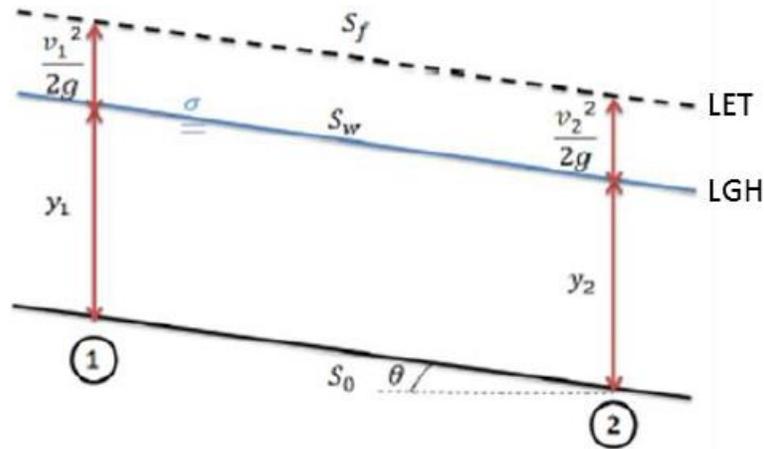


Figura 11. Flujo Uniforme en Canales abiertos. Tomado de Duque (2015).

Del mismo modo, habiendo expuesto los supuestos de diseño más importantes es ahora importante resaltar las propiedades geométricas que tiene el flujo dentro de una tubería. Cabe resaltar que estas propiedades dependen de dos parámetros importantes: el diámetro de la tubería y la relación de llenado (y/d) que se tiene dentro. Dicha relación hace referencia al porcentaje de llenado de la tubería, por lo cual puede ir desde 0%, cuando la tubería está vacía, a un 100%, cuando la tubería está totalmente llena:

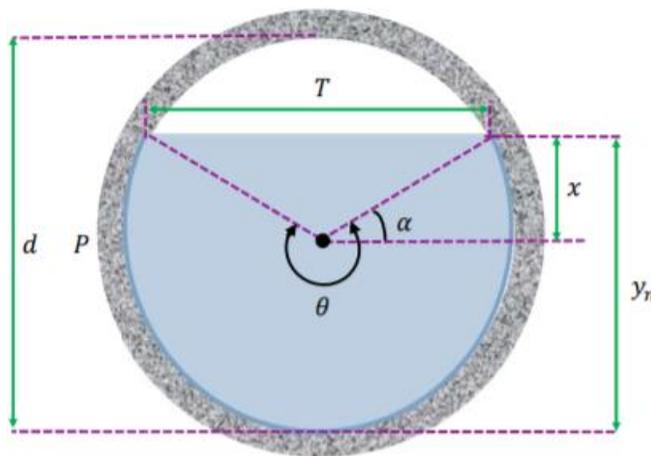


Figura 12. Propiedades geométricas de la tubería. Tomado de Saldarriaga (2020).

Por último, es importante expresar que d hace referencia al diámetro, mientras que y hace referencia a la altura de la lámina de agua, ambas pueden ser observadas en la **Figura 12**.



Propiedades geométricas de la tubería. Tomado de Saldarriaga (2020). Sin más se presentan las ecuaciones que representan dichas propiedades geométricas:

- Ángulo de llenado de la tubería:

$$\theta = \pi + 2 \sin^{-1} \left(\frac{y - 0.5d}{0.5d} \right)$$

Ecuación 2. Ángulo de llenado de la tubería

- Área mojada:

$$A = \frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) d^2$$

Ecuación 3. Área mojada

- Perímetro mojado:

$$P = 0.5 d \theta$$

Ecuación 4. Perímetro mojado

- Radio hidráulico:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d}{4} \frac{(\theta - \sin \theta)}{\theta}$$

Ecuación 5. Radio hidráulico

- Ancho superficial:

$$T = d \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{y - 0.5d}{0.5d} \right) \right)$$

Ecuación 6. Ancho superficial

- Diámetro mojado:



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

Ecuación 7. Diámetro mojado

- Número de Froude:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g D}}$$

Ecuación 8. Número de Froude

- Esfuerzo cortante:

$$\tau_0 = g \rho R S_f$$

Ecuación 9. Esfuerzo cortante

2.1.3 Velocidad del Flujo

Como es costumbre, se utiliza la velocidad media del flujo para así tener en cuenta todas las velocidades presentes al interior de la tubería y no solo una velocidad puntual que no represente la realidad del tramo en cuestión. De esta manera, se presentan a continuación las diversas ecuaciones que se tienen para representar dicha velocidad media:

- **Ecuación de Manning:**

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 10. Velocidad de Manning

Ecuación empírica propuesta por Robert Manning en el año 1889, basada en el trabajo realizado por Darcy y Bazin sobre canales experimentales reales. Dicha ecuación utiliza un factor n , llamado “ n de Manning”, calculado en función de la rugosidad absoluta de la tubería



(o canal). Por otro lado, al ser esta una ecuación empírica formada bajo las observaciones realizadas en canales su uso se ve limitado únicamente al Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR) (Saldarriaga, 2020).

- **Ecuación de Chezy:**

$$v = C \sqrt{R S_f}$$

Ecuación 11. Velocidad de Chezy

Ecuación desarrollada por el ingeniero francés Antoine Chezy alrededor de 1775, conocida solo hasta su posterior publicación en Estados Unidos en el año 1897. La ecuación describe la velocidad en términos de la pendiente, del radio hidráulico y del coeficiente de Chezy (“C”). Dicho coeficiente tiene como fin describir la rugosidad del canal en el cual fluye el agua y sus unidades son las siguientes:

$$[C] = \left[\sqrt{\frac{g}{a}} \right] = m^{1/2}/s$$

Por lo anterior, la ecuación de Chezy solo es válida para el SI (Sistema Internacional de unidades) (Saldarriaga, 2020).

- **Ecuación Explícita:**

$$v = -2 \sqrt{8 g R S_f} \log_{10} \left(\frac{ks}{14.8 R} + \frac{2.51 v}{4 R \sqrt{8 g R S_f}} \right)$$

Ecuación 12. Velocidad explícita

Esta ecuación físicamente basada es el resultado de la unión de dos de ecuaciones:

La ecuación de Darcy – Weisbach que describe las pérdidas por fricción en una tubería en función de un factor de fricción, la gravedad, la longitud, el diámetro y la velocidad de la tubería:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Ecuación 13. Pérdidas por fricción. Darcy - Weisbach



Y la ecuación de Colebrook – White que describe el factor de fricción en función del número de Reynolds, la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{ks}{3.7 d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}}\right)$$

Ecuación 14. Factor de Fricción. Colebrook - White

Al unir estas dos ecuaciones da como resultado la ecuación explícita antes vista, dicha ecuación tiene una mayor aplicabilidad que la de Chezy y la de Manning, debido a que funciona para todo tipo de flujo: hidráulicamente rugoso (FTHR) e hidráulicamente liso (FTHL) (Saldarriaga, 2020).

2.2 Restricciones de Diseño

Todo sistema de alcantarillado debe de cumplir dos objetivos fundamentales al mismo tiempo (Saldarriaga, 2020):

- Capacidad hidráulica: asegurar que, con las propiedades del terreno, del fluido y de la tubería, se logre transportar el caudal demandado.
- Autolimpieza: garantizar que dentro del sistema no ocurra una acumulación de sedimentos que pueda generar algún tipo de obstrucción en la tubería y una subsecuente sobrecarga del sistema.

De esta manera el RAS (2016) estableció una serie de restricciones de diseño para todo el territorio colombiano. Dichas restricciones son:

- Diámetro nominal mínimo: esta restricción se tiene para facilitar el mantenimiento del sistema. Para alcantarillados de aguas residuales se tiene que el diámetro nominal mínimo es de 170 mm, mientras que para alcantarillados de aguas lluvias es de 215 mm.
- Relación máxima de llenado (y/d): esta restricción es con el fin de que dentro de la tubería no se presente socavación, ni ningún otro fenómeno que pueda afectar la integridad de la misma. Para todo tipo de alcantarillado esta relación máxima de llenado es del 85%.
- Velocidad máxima en las tuberías: la restricción de velocidad máxima cumple la función de, entre otras cosas, evitar las pérdidas de energía en curvas y uniones, evitar la formación de resaltos hidráulicos, evitar el entrapamiento de aire, etc. Para todo tipo de alcantarillados esta restricción tiene un valor de 5 m/s, sin embargo, se puede permitir una velocidad máxima de hasta 10 m/s si las tuberías están hechas de algún material plástico como el PVC.



- Pendiente máxima en la tubería: la pendiente con la cual, dentro de la tubería, el fluido esté a la velocidad máxima permitida.
- Flujo Cuasicrítico: se debe evitar el flujo Cuasicrítico (Número de Froude entre 0.7 y 1.5) debido a que este tipo de flujo, al ser muy inestable, puede ocasionar la presurización de la tubería.
- Profundidad mínima: para asegurar la protección de las tuberías y que todo caudal pueda ser ingresado al sistema por gravedad el RAS establece una profundidad mínima de la cota clave de la tubería para vías peatonales o zonas verdes de 0.75 m y para vías vehiculares de 1.2 m. Para el presente documento se decidió utilizar una profundidad mínima de 1.5 m.
- Profundidad máxima: establecida en 5 m por el RAS, esta profundidad fue variada en el presente documento para así garantizar la factibilidad del diseño.
- Velocidad mínima: para garantizar la autolimpieza. Esta restricción cuenta con un valor de 0.45 m/s para los alcantarillados de aguas residuales y, para los de aguas lluvias, un valor de 0.75 m/s.
- Pendiente mínima: la pendiente en la cual se cumplan todos los criterios de autolimpieza.
- Esfuerzo cortante mínimo: al igual que con la restricción de la velocidad mínima, el esfuerzo cortante mínimo sirve para garantizar la autolimpieza. Para alcantarillados de aguas residuales esta cuenta con un valor de 2 Pascales, mientras que para los de aguas lluvias esta tiene un valor de 3 Pascales.

3 Metodología

3.1 Redes a utilizar

En este documento se diseñarán y, posteriormente, analizarán cuatro redes utilizando el programa UTOPIA. Dichas redes son:

- Miraflores: ubicada en Boyacá, es una red de interceptores principales diseñada por el PDA de Boyacá. La red cuenta con una configuración tuberías – pozos relativamente sencilla, teniendo así cuatro series de tuberías visibles (Cardona, 2019).
- Chicó Sur: ubicada en la localidad de Usaquén de la ciudad de Bogotá esta será la red más compleja a diseñar debido al gran número de tuberías que posee.
- Mays y Wenzel: red patrón propuesta por los investigadores Larry W. Mays y Harry G. Wenzel en el año 1976 en el artículo “*Optimal Design of Multilevel Branching Sewer Systems*”, artículo que fue publicado en la revista *Water Resources Research*.



- Li y Matthew: red patrón propuesta por los investigadores Guiyi Li y Robert G. S. Matthew en el año 1990 en el artículo “*New Approach for Optimization of Urban Drainage Systems*”, publicado en el *Journal of Environmental Engineering*. Esta red al igual que la red propuesta por Mays y Wenzel cuentan con gran relevancia a nivel internacional por lo cual resulta provechoso realizar su diseño y análisis.

De esta manera, en el presente documento se trabajarán con dos redes existentes y dos redes patrón.

3.2 UTOPIA

El programa UTOPIA es un programa de diseño de redes de drenaje urbano, el cual fue desarrollado por Duque (2015) en su documento de tesis denominado: “metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado”. En el documento la autora describe el diseño de redes de alcantarillado como un proceso conformado por dos componentes fundamentales: la definición del trazado de la red y el diseño hidráulico. El trazado, hace referencia a la forma en que se deben colocar las tuberías, con el fin de que se defina el sentido de flujo en cada tubería y el tipo de esta (de inicio o continua). En este orden de ideas, el diseño hidráulico se define como el proceso de selección del diámetro y la pendiente de cada tubería de manera que se obtenga un diseño que cumpla con una serie de requisitos y restricciones hidráulicas establecido por el RAS. En adición a esto, durante el proceso de diseño de la red se realiza una evaluación económica para encontrar aquel diseño que tiene el mínimo costo de construcción (Cardona, 2019). En otras palabras, la metodología global para el diseño de redes de drenaje urbano es un proceso iterativo donde en cada iteración se encuentra un trazado y de acuerdo con este trazado se crea un diseño hidráulico optimizado de la red. Además, con los resultados de esta iteración, se mejora la función de costos con el fin de que el trazado encontrado en la siguiente iteración sea mejor que el pasado (Vargas, 2016).

De acuerdo con lo anterior, para este proceso iterativo se reciben como datos de entrada las coordenadas de cada pozo de la red, el caudal aferente a cada pozo y el número de iteraciones. Además, se inicia de un trazado aleatorio junto con información adicional referente a los materiales de las tuberías y los diámetros disponibles. Posteriormente, se realiza el diseño hidráulico con ese primer trazado, obteniendo así, el diámetro, la pendiente y los costos de construcción para cada tramo de la red. Con esta información, se modifica la función de costos actual para luego esta pasar a ser la nueva función objetivo que permite encontrar el trazado de la siguiente iteración mediante un proceso de optimización. De esta manera, se mejora el ajuste de la función objetivo para la selección del trazado hasta llegar al número de iteraciones indicado. Por consiguiente, al final se logra encontrar el mejor diseño posible de la red para ese número de iteraciones (Vargas, 2016). En este orden de ideas, una iteración



se puede ver como tres procesos diferentes, los cuales son la selección del trazado, el diseño hidráulico y la estimación de la función de costos para seleccionar el trazado nuevamente.

3.2.1 Datos de entrada

Como se mencionó anteriormente, UTOPIA debe de conocer que red está a punto de diseñar por lo que el usuario tiene que suministrarle al programa un archivo de texto (.txt) con la siguiente configuración:

Manholes (Número de pozos) (ID del pozo) (Caudal de entrada) (Coordenada X) (Coordenada Y) (Coordenada Z) Sections (Número de tramos) (ID pozo aguas arriba) (ID pozo aguas abajo)

Figura 13. Configuración del archivo de texto. Tomado del CIACUA (2020)

Como se puede ver en la **Figura 13. Configuración del archivo de texto. Tomado del CIACUA (2020)**, el archivo de texto cuenta con dos partes, una primera que debe de tener la cantidad de manholes o pozos que posee la red, siendo estos identificados con un número (ID del pozo) y suministrando en seguida el caudal de entrada en m^3/s , y las coordenadas X, Y y Z de dicho nodo. Por otro lado, la segunda parte del archivo de texto debe de tener la cantidad de tuberías que posee la red a la vez que identifica los pozos que la conforman.

A continuación, se muestra parte del archivo de texto utilizado para la red Chicó Sur original. Todos los archivos de texto utilizados se muestran en la sección de anexos.



Tabla 2. Ejemplo del archivo de texto - Parte 1 - Red Chicó Sur

Manholes 109

1	0.0124009582314359	2145.39	7352.39	2561.931
2	0.0221923820246703	1982.51	7441.01	2558.897
3	0.0217019406165307	1784.49	7532.93	2557.411
4	0.0208548939056829	1632.28	7617.99	2557.418
5	0.0156636071705727	1452.89	7704.76	2555.874
6	0.011943600954053	1317.86	7779.49	2554.951
7	0.0110120324869179	2233.12	7204.6	2568.56
8	0.0151991547835286	2097.16	7271.09	2563.112
9	0.0133374949881298	1932.99	7372.47	2557.932
10	0.0134515796029021	1835.94	7416.57	2557.326
11	0.0176237574593432	1747.32	7462.52	2556.901
12	0.0142998920109116	1650.5	7499.21	2556.719
13	0.0170898464706608	1588	7531.5	2556.617
14	0.0127339600244048	1524.17	7564.57	2555.869
15	0.0125883440170179	1460.84	7597.47	2555.782
16	0.0125985333811962	1397.46	7630.55	2555.37
17	0.00944776486560091	1333.26	7661.29	2554.93
18	0.00941501030041415	1202.87	7770.98	2553.848

Tabla 3. Ejemplo del archivo de texto - Parte 2 - Red Chicó Sur



Sections 160

2 1
3 2
4 3
5 4
6 5
8 1
8 7
9 2
10 9
11 10
11 3
12 11
13 12
13 4
14 13
15 14
16 15
17 16
18 6
18 25
19 7
20 8

Por último, cabe aclarar que UTOPIA también requiere que el usuario ingrese tanto la lista de diámetros comerciales, como la rugosidad absoluta (ks) de las tuberías.

3.2.2 Selección del trazado

En el trazado de la red se define el tipo de tubería y la dirección de esta en cada tramo de la red, cumpliendo con ciertas restricciones de factibilidad (Vargas, 2016). Para este proceso se conoce información como la topografía y topología de la red además de los diferentes nudos adyacentes. Por lo tanto, con base en esto, se modela la red de alcantarillado como un grafo dirigido con las posibilidades existentes de conexión: tubería de inicio o continua y los dos sentidos de flujo posibles (González, 2016).

Conociendo cuáles son todos los nodos de la red que deben estar conectados entre sí, es decir el número de tramos de la red, se logra saber todos los posibles trazados que se pueden formar a partir de estas opciones (de inicio o continua | un sentido o el otro) por tramo. Cabe que resaltar que, para trazados muy grandes, el número de trazados posibles incrementa, no obstante, si se miran solo las combinaciones de tramos que dan como resultado trazados factibles, el número de posibilidades se reduce considerablemente y el problema se facilita



(Vargas, 2016). Por lo tanto, se establecen las siguientes restricciones de factibilidad para el trazado de la red:

-Restricción de balance:

Se relaciona con la ley de conservación de la masa. Por lo tanto, es pertinente asegurar que el flujo que sale de un nodo sea igual a la sumatoria del caudal que entra por ese nodo con el caudal que poseen las demás tuberías que le llegan.

-Límite inferior del flujo:

Si existe una conexión entre nodos y la dirección del flujo sale del nodo, el caudal mínimo de ese tramo debe ser igual al caudal que entra por ese nodo dividido por n , donde n hace referencia al número de tramos que salen del mismo nodo.

-Límite superior del flujo:

Si existe un tramo, el caudal máximo que puede llevar es cualquier valor positivo mayor o igual a cero. En caso contrario, (donde no exista el tramo) el caudal máximo es cero.

-Conexiones entre tuberías adyacentes:

Las conexiones entre dos tuberías seguidas solo pueden darse si la primera es un inicio y la que sigue es continua o si ambas son continuas. Por lo tanto, se restringe la conexión entre una tubería continua seguida por una de inicio o de una tubería de inicio seguida por otra de inicio. Esto debido a que, esta conexión interrumpiría el flujo de agua a través de la red.

-Sentido de flujo y tipo de tubería en la descarga:

Solo es permitido que una tubería esté directamente conectada al nodo de descarga. Asimismo, el tipo de tubería debe ser siempre continua y la dirección de esta debe ser siempre hacia la descarga.

-Flujo de la tubería en la descarga:

El caudal correspondiente a esa tubería debe ser igual a la sumatoria de los caudales de entrada de todos los nodos de la red, con el fin de garantizar que no hay pérdidas de agua en el sistema.

En relación con lo anterior, para resolver el problema de la selección del trazado de la red, se hace un modelaje matemático basado en el problema de diseño de redes (Network Design



Problem). Para esto, se representa matemáticamente cada una de las restricciones previamente mencionadas y la red se mira como un grafo dirigido.

3.2.3 Diseño Hidráulico

Teniendo ya el trazado lo siguiente es realizar el diseño hidráulico. Lo anterior consiste, como lo vimos anteriormente, en encontrar la combinación diámetro – pendiente de todas las tuberías que constituyen la red de manera que se pueda transportar el caudal requerido (Duque, 2015).

Para esto, la metodología de Duque (2015) modela el grafo como si fuera un problema de ruta más corta (la ruta más corta desde todos los inicios hasta el nodo de descarga). Dicho problema se resuelve utilizando el algoritmo de Bellman – Ford por lo que es necesario representar la red como una red abierta, es decir pasar del trazado obtenido (González, 2016):



Trazado

$$\mathcal{G}_L$$

Nodos trazado

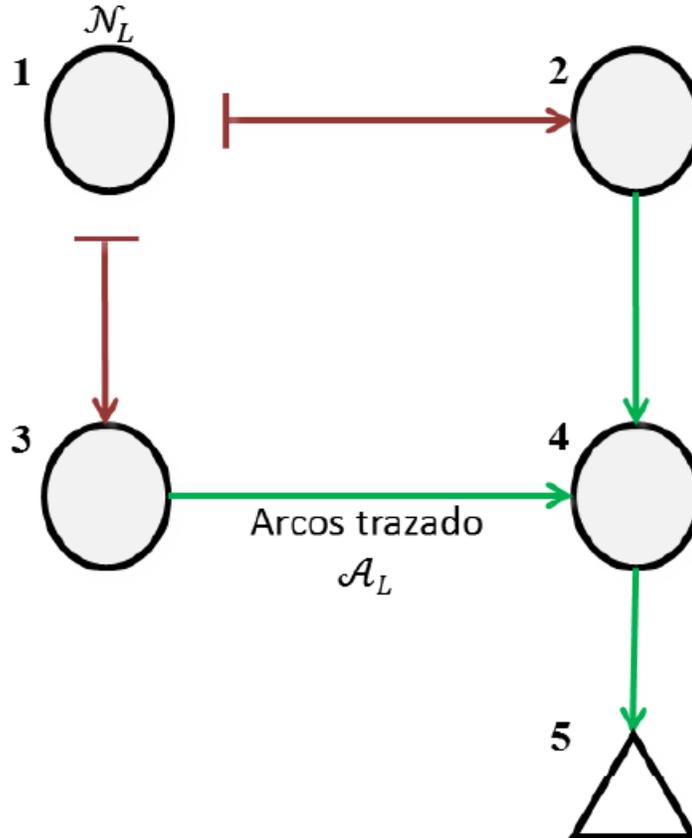


Figura 14. Trazado - Diseño hidráulico. Tomado de Duque (2015)

A una representación de árbol, en la cual se añaden nodos extra en los pozos que posean más de una tubería de inicio:

Árbol

\mathcal{G}_T

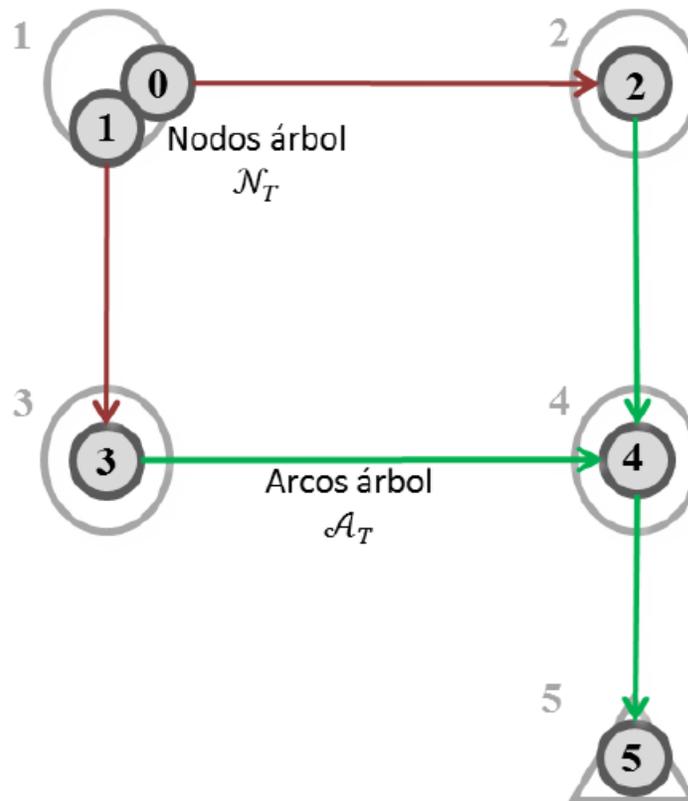


Figura 15. Árbol - Diseño hidráulico. Tomado de Duque (2015)

Con los pozos o nodos extra se logra que cada inicio tenga una única ruta al nodo de descarga.

Después de realizado este árbol se procede a un grafo auxiliar en el cual se prueban todas las combinaciones posibles de diámetro y pendiente de cada tramo. Dichas combinaciones se ven restringidas por:



- Diámetro de las tuberías: el diámetro de una tubería continua solo puede ser igual o mayor a la tubería aguas arriba. Lo anterior obliga a ir reduciendo la cantidad de diámetros disponibles a medida que se construye la red.
- Cotas de las tuberías: La pendiente de las tuberías no puede ser contraria a la gravedad (no puede haber pendiente adversa).

La representación dada por Duque (2015) del grafo auxiliar previamente mencionado es la siguiente:

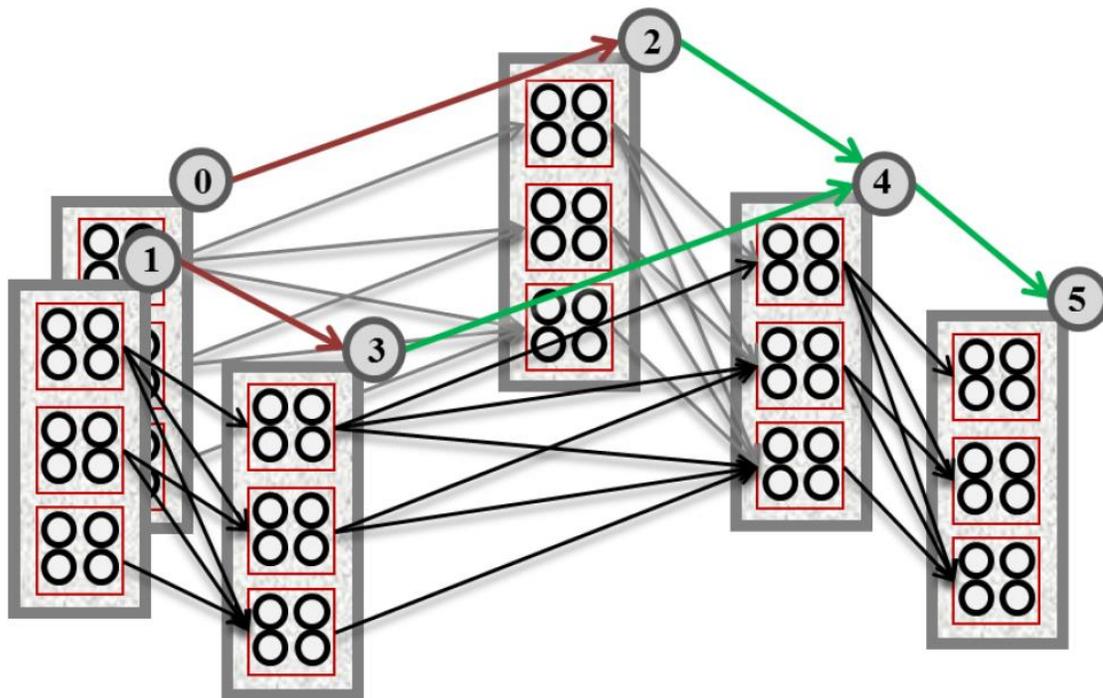


Figura 16. Grafo auxiliar. Tomado de Duque (2015)

Finalmente, con el trazado y el diseño hidráulico realizados, el diseño obtenido se optimiza y se encuentra un diseño final, que corresponde al diseño más económico posible usando la función objetivo de costos. Además, el programa UTOPIA utiliza una conexión con el software de optimización Xpress-MP, donde se implementó el modelo matemático de las restricciones ya que este software cuenta con un solver de optimización entera mixta (Vargas, 2016).



3.2.4 Función objetivo de Costos

Se utiliza como función objetivo de costos la propuesta por Maurer et al (2013) en el paper “Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer infrastructure model”, ecuación que establece los costos de construcción específicos relacionando la profundidad media de la tubería, el costo asociado al diámetro de la tubería y la cobertura de la superficie; en otras palabras la ecuación de Maurer relaciona los costos de instalación con los costos de excavación, dando como resultado los costos de un tramo por metro lineal. Cabe mencionar que dicha ecuación es el resultado de un modelo de economías realizado en la ciudad de Dubendorf, Suiza.

Continuando con lo anterior, la ecuación de Maurer es la siguiente:

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

Ecuación 15. Costos de Maurer

Donde:

$$C = \text{Costos específicos de construcción} \left[\frac{\text{USD\$}}{m} \right]$$

$$\alpha = \text{Coeficiente de costos en función de la profundidad de la tubería} \left[\frac{\text{USD\$}}{m^2} \right]$$

$$D = \text{profundidad media de la tubería [m]}$$

$$\beta = \text{Coeficiente de costos en función al diámetro y cobertura de la tubería} \left[\frac{\text{USD\$}}{m} \right]$$

Dichos coeficientes son calculados de la siguiente manera:

$$\alpha = m_{\alpha} d + n_{\alpha}$$

Ecuación 16. Costos en función de la profundidad de la tubería

$$\beta = m_{\beta} d + n_{\beta}$$

Ecuación 17. Costos en función del diámetro y cobertura de la tubería

Donde:

m_{α} y n_{α} son las constantes producto de las regresiones realizadas en el modelo de costo.



m_α y n_α son expresadas en $\left[\frac{\text{USD}\$}{\text{m}^3}\right]$ y $\left[\frac{\text{USD}\$}{\text{m}^2}\right]$ respectivamente.

m_β y n_β son las constantes producto de las regresiones realizadas en el modelo de costo.

m_β y n_β son expresadas en $\left[\frac{\text{USD}\$}{\text{m}^2}\right]$ y $\left[\frac{\text{USD}\$}{\text{m}}\right]$ respectivamente.

$d = \text{diametro de las tuberías [m]}$

Por lo tanto, la ecuación extendida sería:

$$C = (m_\alpha d + n_\alpha) D + m_\beta d + n_\beta$$

Ecuación 18. Función de costos de Maurer extendida

Sin embargo, como se mencionó antes la ecuación de Maurer proporciona los costos por metro lineal, si se quiere obtener el costo total del tramo es necesario multiplicar la ecuación anterior por la longitud de la tubería:

$$C = \left((m_\alpha d + n_\alpha) D + m_\beta d + n_\beta \right) l$$

Ecuación 19. Función de costos de Maurer para toda la red

Donde:

$C = \text{costo del tramo [USD\$]}$

$l = \text{longitud de la tubería [m]}$

Del mismo modo, para las constantes antes mencionadas ($m_\alpha, n_\alpha, m_\beta$ y n_β) se utilizarán los siguientes valores:



Tabla 4. Constantes utilizadas en la ecuación de Maurer

Constante	Valor
m_{α}	1.02
n_{α}	127
m_{β}	0.11
n_{β}	-35

Sin embargo, se puede notar que la **Ecuación 19. Función de costos de Maurer para toda la red** no tiene en cuenta en ningún momento la existencia de cámaras de caída dentro de la red, es por tal motivo que se requiere adicionar un factor que si lo haga. Para ello Peinado (2014) en su tesis de especialización: “Uso del programa CIE-Agua para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Redes patrón para Colombia” establece que, para Colombia, el costo de las cámaras de caída realizadas en concreto y con un diámetro de 1.20 m esta dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 20. Ecuación de costos para las cámaras de caída de Peinado (2014)

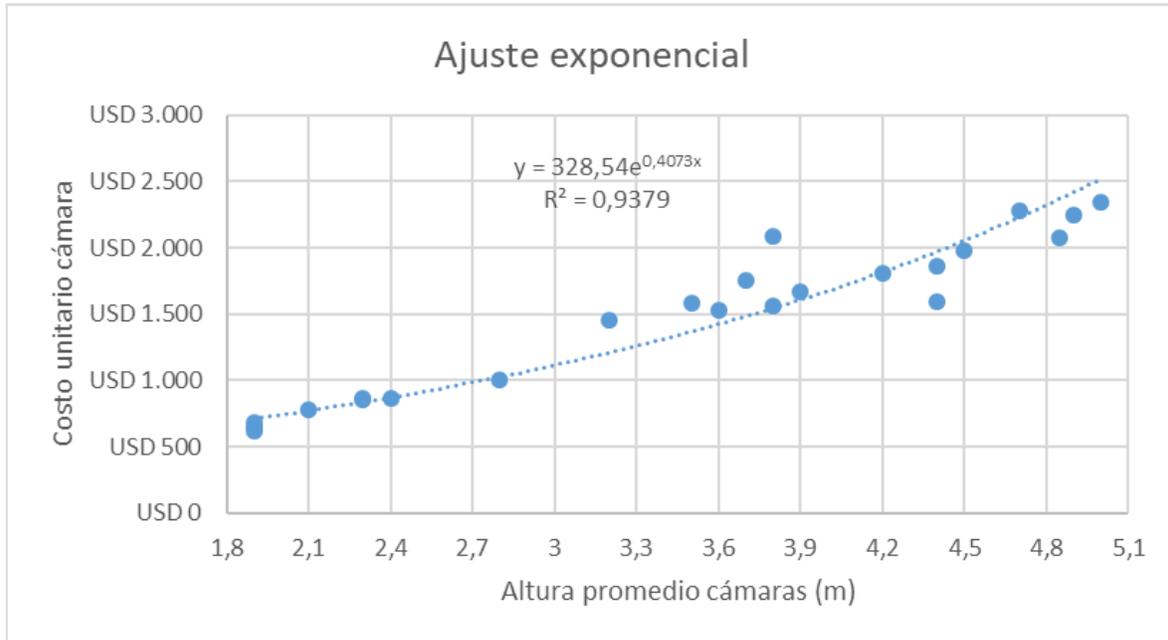
$$C = 2065338.568 - 321218.85 x + 1.1515 x^2$$

Donde:

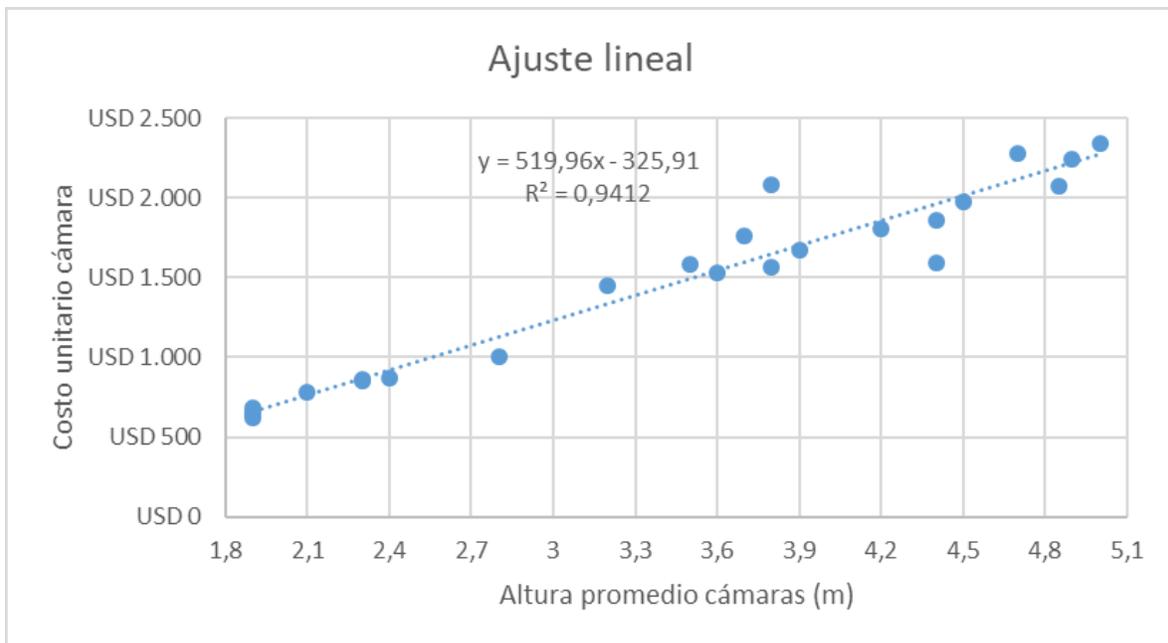
$$C = \text{costos de construcción de cámaras de caída [COP/m]}$$

$$x = \text{profundidad de la cámara [m]}$$

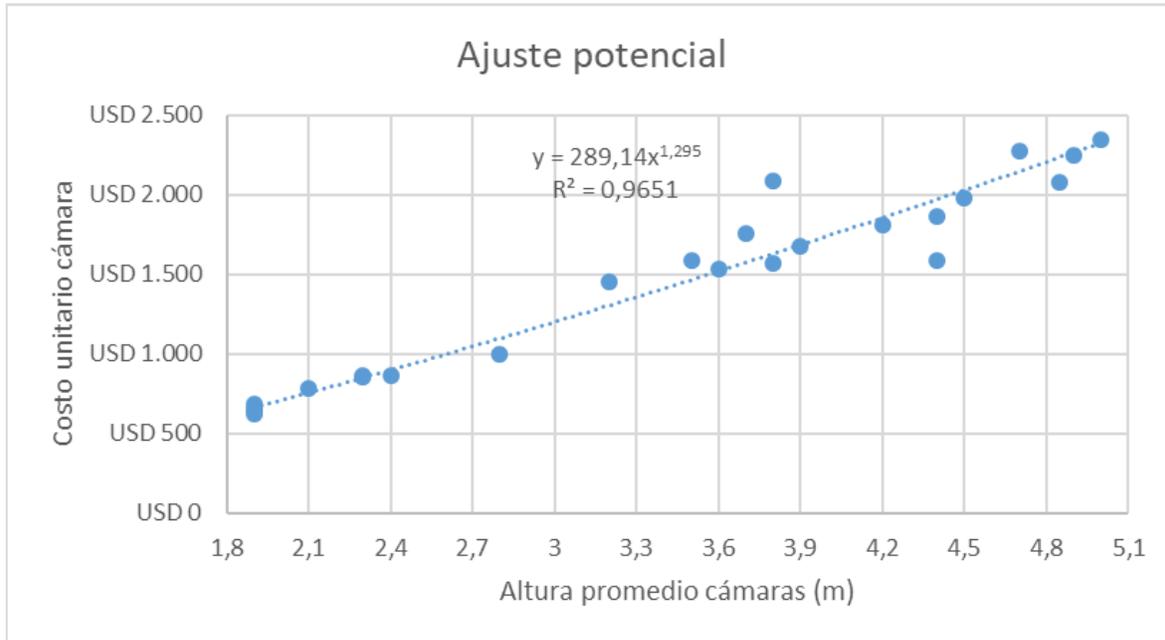
A su vez, Marú (2018) en su tesis “Diseño optimizado de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado incluyendo estructuras de caída” realizó múltiples diseños, con lo cual ajustó la ecuación de Peinado (2016), teniendo en cuenta el costo unitario de la cámara y la altura promedio de las mismas, obteniendo así los siguientes resultados:



Gráfica 1. Ajuste exponencial costo de cámaras. Tomado de Marú (2018)



Gráfica 2. Ajuste lineal costo de cámaras. Tomado de Marú (2018)



Gráfica 3. Ajuste potencial costo de cámaras. Tomado de Marú (2018)

Tabla 5. Coeficientes de ajuste obtenidos por Marú (2018)

	Ajuste		
	Exponencial	Lineal	Potencial
R	0.9379	0.9412	0.9651

De esta manera, se concluyó que el mejor ajuste posible para la **Ecuación 20. Ecuación de costos para las cámaras de caída de Peinado (2014)** es el potencial, por lo tanto, la expresión para tener en cuenta el costo de las cámaras de caída es:

Ecuación 21. Ecuación de costos utilizada para las cámaras de caída

$$C_c = 289.14 H^{1.3}$$

Donde:

C_c = costo unitario de la construcción de una cámara de caída (US\$)

H = altura de la cámara (m)



Continuando con lo anterior, es importante notar que la **Ecuación 21. Ecuación de costos utilizada para las cámaras de caída** hace referencia a una única cámara de caída. Con lo anterior se quiere decir que dicha ecuación debe de utilizarse tantas veces como cámaras de caída existan en una red, por lo que conviene expresarla como una sumatoria.

Sin más, se presenta la ecuación de costos final:

Ecuación 22. Ecuación de costos final

$$C = ((1.02 d + 127) D + 0.11 d - 35) l + \sum_{i=1}^n (289.14 H_i^{1.3})$$

Donde:

d: diámetro (m)

D: profundidad media de la tubería (m)

l: longitud del tramo (m)

H: altura de la cámara (m)

C: costo del tramo(USD\$)

La **Ecuación 22. Ecuación de costos final** es la ecuación que el programa UTOPIA usará como función objetivo cuando realice los diseños en este documento.

3.3 Método de variación topográfica

Debido a que el objetivo de este proyecto de grado es estudiar el diseño optimizado de redes de drenaje urbano para ciudades de alta pendiente se utilizará la metodología de variación topográfica expuesta por Noriega (2020) para inclinar los terrenos de las redes previamente mencionadas. Esta metodología será explicada a continuación:

Primero que nada, la metodología requiere conocer los siguientes parámetros:

- M: Conjunto de pozos que conforman la red de alcantarillado
- ∇ : Conjunto de cotas de elevación (coordenada z) de los pozos
- M_m : Pozo de menor cota
- ∇_m : Cota del pozo M_m

Seguidamente, se encuentra la tasa de variación lineal:



Ecuación 23. Tasa de variación lineal - Metodología de Noriega (2020)

$$\Delta z_i = \frac{\nabla_i - \nabla_m}{V}$$

Donde:

Δz_i : tasa de variación lineal para el pozo i

∇_i : cota del pozo i

∇_m : cota del pozo m

V: constante arbitraria

Como resulta evidente, la tasa de variación lineal se debe encontrar para cada pozo de la red.

Por último, se encuentra la nueva cota del pozo i:

Ecuación 24. Nueva cota para el pozo i - Metodología de Noriega (2020)

$$\nabla_{i_{j+1}} = \nabla_{i_j} - \Delta z_i$$

Donde:

$\nabla_{i_{j+1}}$: cota del pozo i para la variación j+1

∇_{i_j} : cota del pozo i para la variación j

Por otro lado, esta metodología permite utilizar distintos “pasos” para obtener así terrenos más o menos inclinados:

Ecuación 25. Nueva cota para el pozo i con un paso n

$$\nabla_{i_{j+1}} = \nabla_{i_j} - (n) \Delta z_i$$

Donde:

n: paso a utilizar

De igual forma es importante aclarar que para este proyecto de grado se utilizará un valor de -5 para la constante V. A su vez, se debe notar que esta metodología solo varía la elevación



(cota) de los pozos, por lo que el caudal de entrada y las coordenadas X y Y permanecen constantes en todos los terrenos.

Para finalizar, se muestra un ejemplo de la metodología con la red Miraflores:

1. Se conocen todos los parámetros requeridos, de manera que se sabe que la red cuenta con 48 pozos y el pozo de menor cota es el de descarga (pozo 48), cuya cota es de 1271.5 m.s.n.m.
2. Se desea variar la cota del pozo 24, cuya elevación es de 1323.5 m.s.n.m.
3. Se utiliza la **Ecuación 23. Tasa de variación lineal - Metodología de Noriega (2020)**:

$$\Delta z_i = \frac{\nabla_i - \nabla_m}{V}$$

$$\Delta z_i = \frac{1323.5 - 1271.5}{-5} = -10.4$$

4. Se utiliza la **Ecuación 25** con un paso (n) de 12:

$$\nabla_{i_{j+1}} = 1323.5 - ((12) (-10.4)) = 1448.3 \text{ m. s. n. m.}$$

5. De esta manera, se obtiene que la nueva cota para el pozo 24 es de 1448.3 m.s.n.m.

3.4 Nomenclatura utilizada

Debido a que se tendrán diferentes terrenos para una misma red se utilizará la siguiente nomenclatura para su diferenciación:

- Cuando el terreno es el original, es decir, no se ha utilizado ninguna variación topográfica, se referirá a él como:
 - Terreno original – Red (nombre de la red)
- Cuando el terreno ha sido variado con la metodología de Noriega (2020) se referirá a él como:
 - Terreno inclinado (n) – Red (nombre de la red)

Donde n es el “paso” utilizado. Dicho n puede verse en la **Ecuación 25**.



3.5 Diámetros utilizados

A continuación, se muestra la lista de diámetros comerciales a utilizar:

Tabla 6. Lista de diámetros comerciales

Diámetros (mm)
182
227
452
595
670
747
824
977.6
1054

A su vez, se puede clasificar esta lista de diámetros en tres grupos: diámetros pequeños, diámetros medianos y diámetros grandes:

Tabla 7. Clasificación de diámetros

Diámetros (mm)	
182	Menores
227	
452	
595	Medianos
670	
747	
824	Grandes
977.6	
1054	

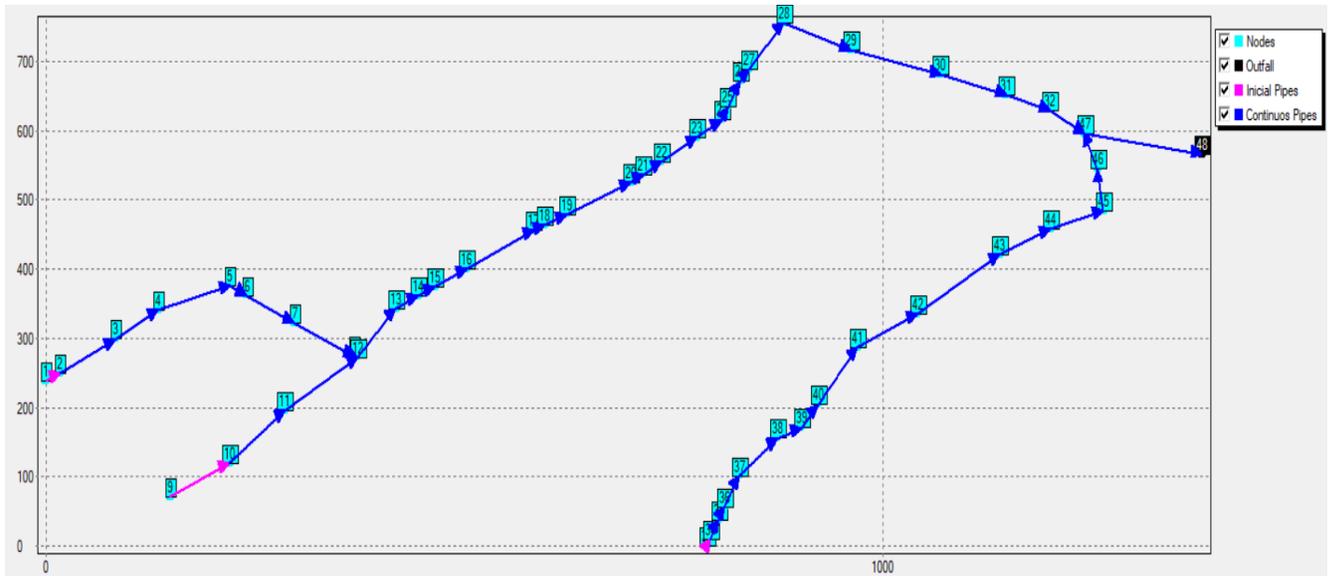
Por último, se debe aclarar que el material de tuberías a utilizar es el PVC ($k_s = 1.5 * 10^{-6}m$).



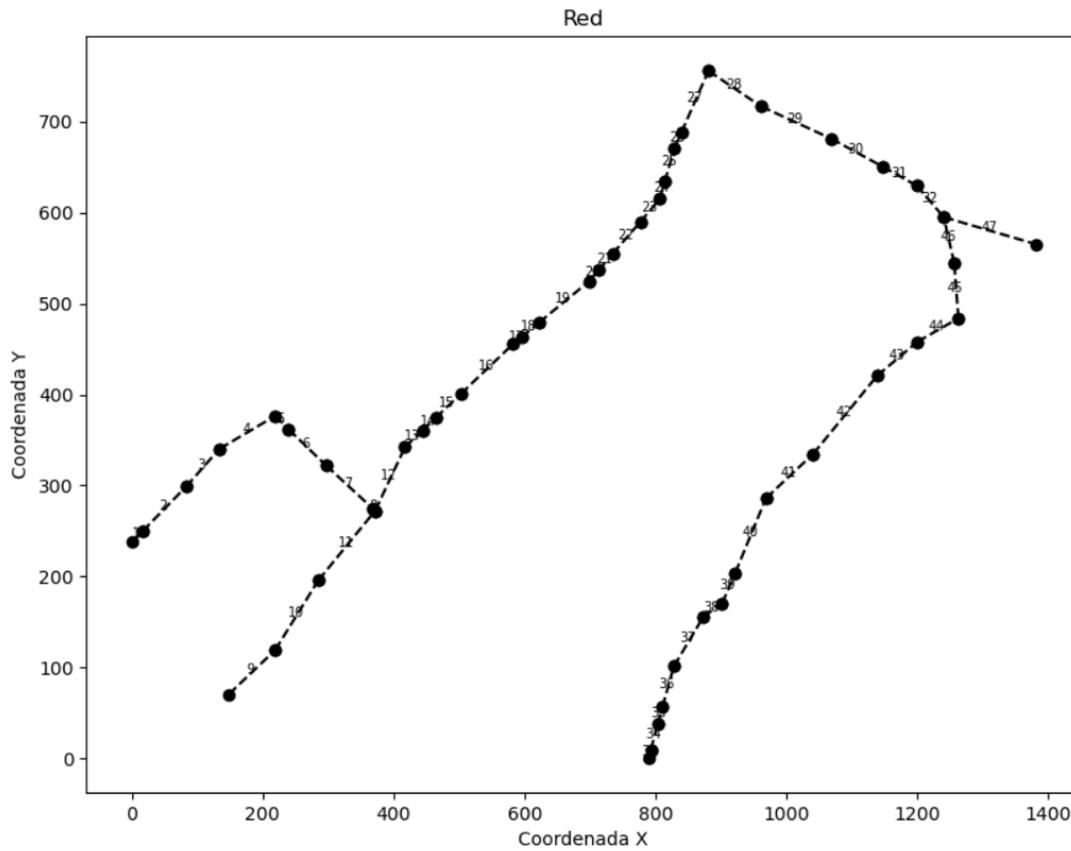
4 Resultados

4.1 Red Miraflores

La red Miraflores consta de 48 pozos y 47 tuberías. A cada pozo le entra un caudal de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo así un caudal de descarga de $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta red sí presenta cámaras de caída.



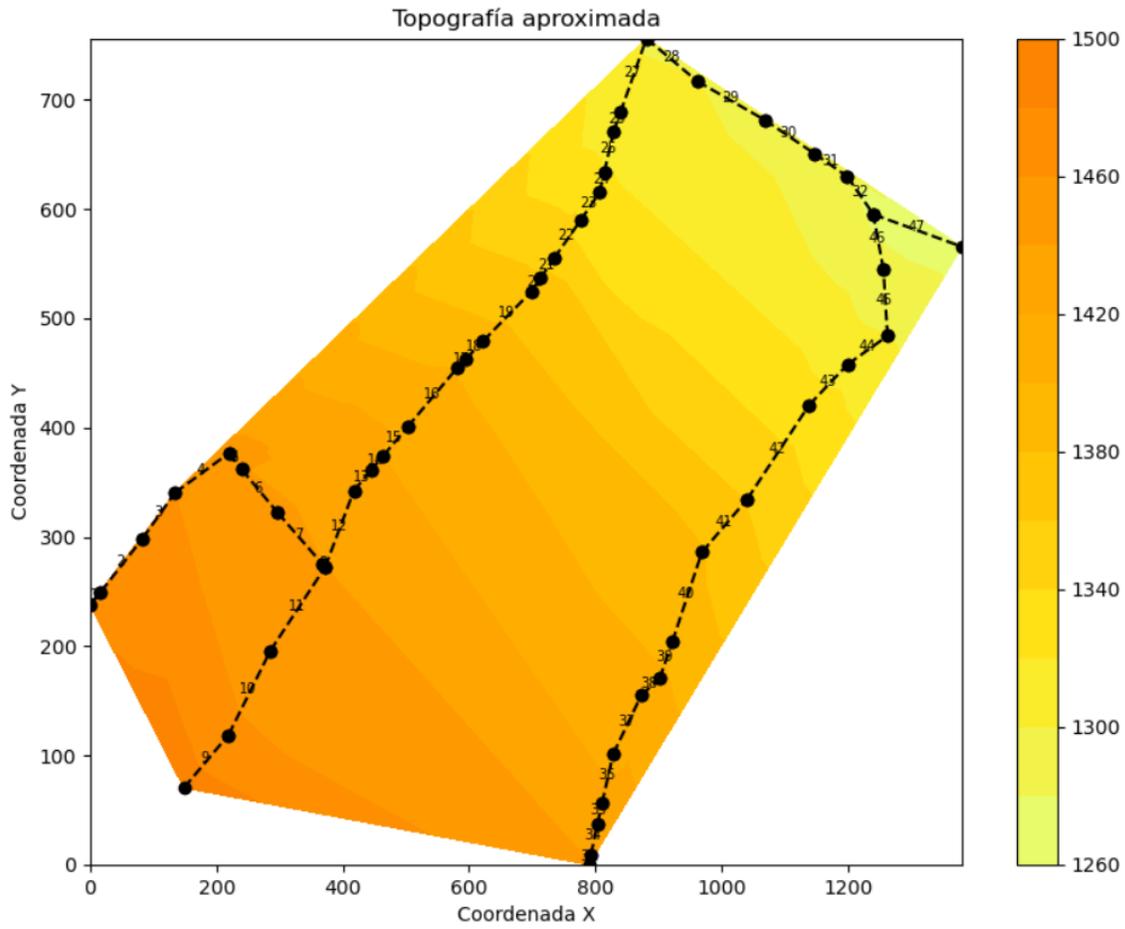
Gráfica 4. Red Miraflores - Modelada en Xpress



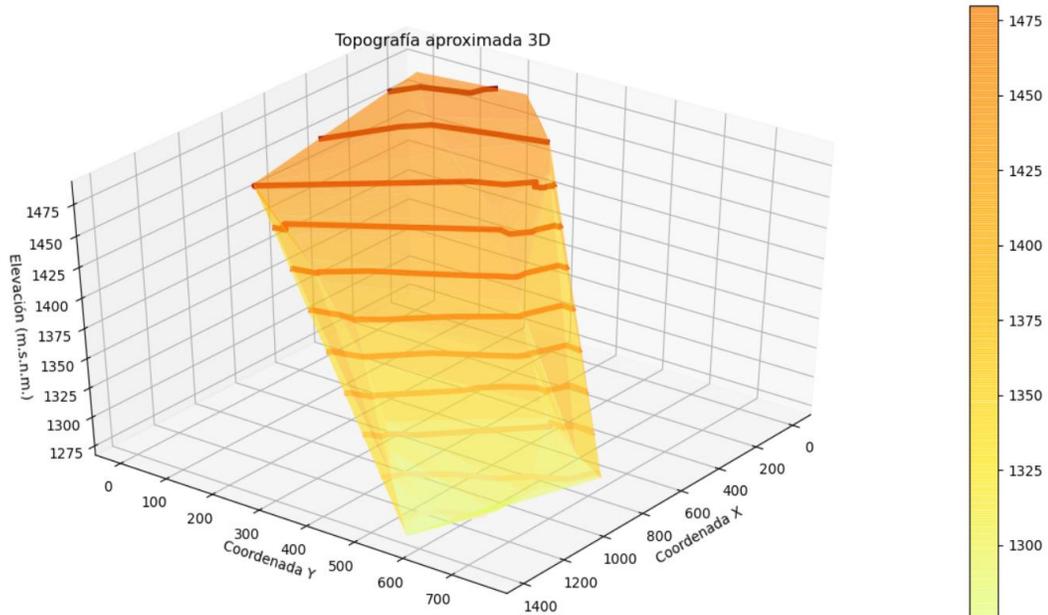
Gráfica 5. Red Miraflores

4.1.1 Terreno original – Red Miraflores

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 6. Terreno original - Red Miraflores: Topografía



Gráfica 7. Terreno original - Red Miraflores: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno original de la red Miraflores:

Tabla 8. Resultados: Terreno original - Red Miraflores

Red Miraflores	
Original	
Longitud (m)	2870.56
Costo T y E (USD\$)	375913.88
Diferencia de nivel (m)	
Max	33.1
Min	0.05
Prom	8.95
Velocidad (m/s)	
Max	9.82
Min	0.85
Prom	5.29
Pendiente	
Max	0.5761
Min	0.00056
Prom	0.1744

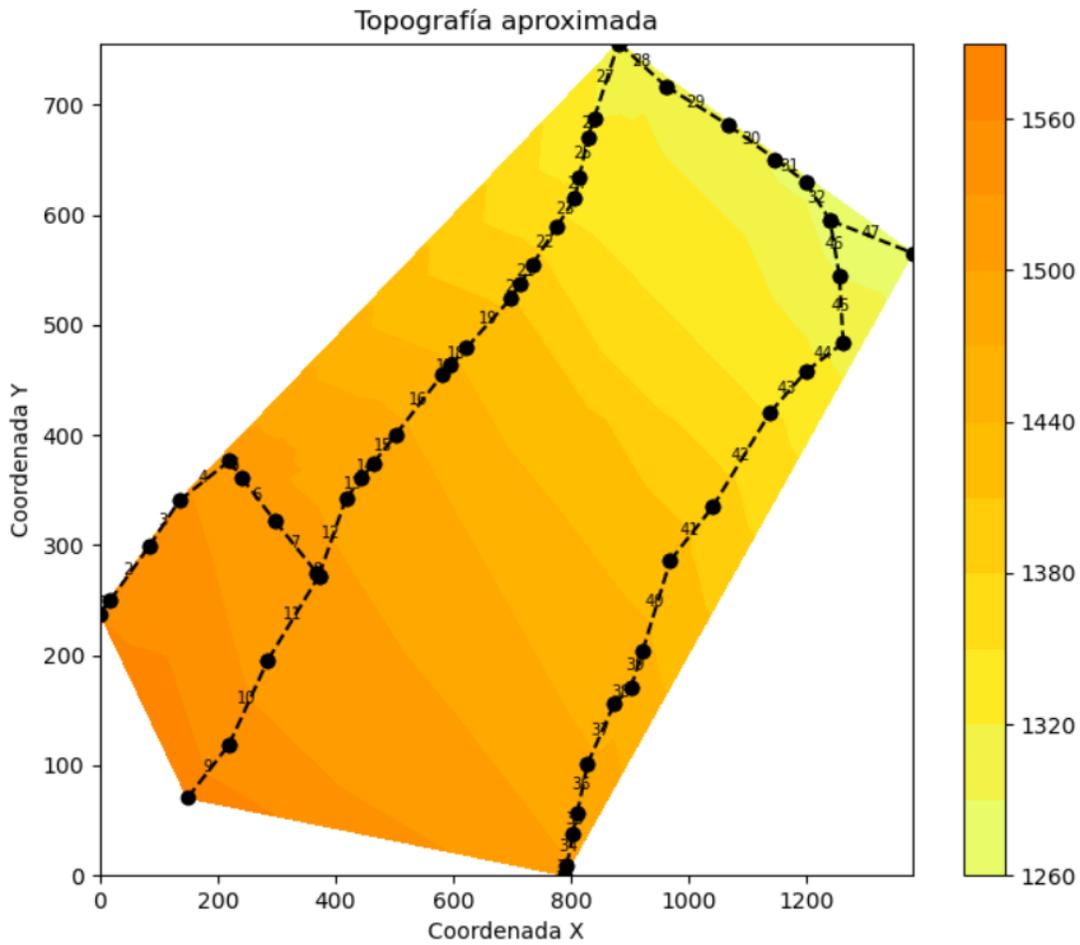


Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	375913.88

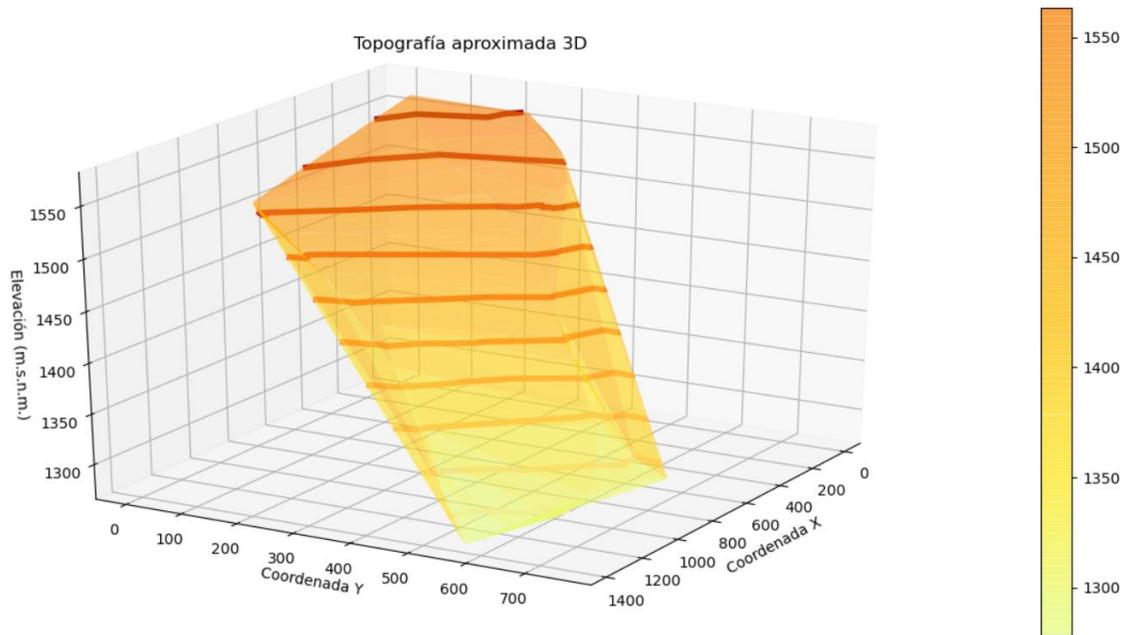
Como resultados se presentan la longitud de la red (la suma de todas las longitudes de tuberías utilizadas) y el costo T y E (costo por tuberías y excavación), seguidamente se muestran los valores máximos, mínimos y promedios de las pendientes en las tuberías, de las velocidades de flujo, y las diferencias de nivel, esto último hace referencia a la diferencia de nivel (altura) entre el nodo (pozo) inicial y final de una tubería, del mismo modo se presentan los resultados referentes a las cámaras de caída, presentado su número, el pozo en el que se encuentran, su altura y el costo de todas las cámaras. Por último, se muestra el costo total (Costo T y E más el Costo Cámaras).

4.1.2 Terreno inclinado (2) – Red Miraflores

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 8. Terreno inclinado (2) - Red Miraflores: Topografía



Gráfica 9. Terreno inclinado (2) - Red Miraflores: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (2) de la red Miraflores:

Tabla 9 Resultados: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores

Red Miraflores	
Inclinado (2)	
Longitud (m)	2906.29
Costo T y E (USD\$)	434482.14
Diferencia de nivel (m)	
Max	46.18
Min	0.07
Prom	12.26
Velocidad (m/s)	
Max	10.00
Min	0.85
Prom	5.88
Pendiente	
Max	0.8066
Min	0.000784

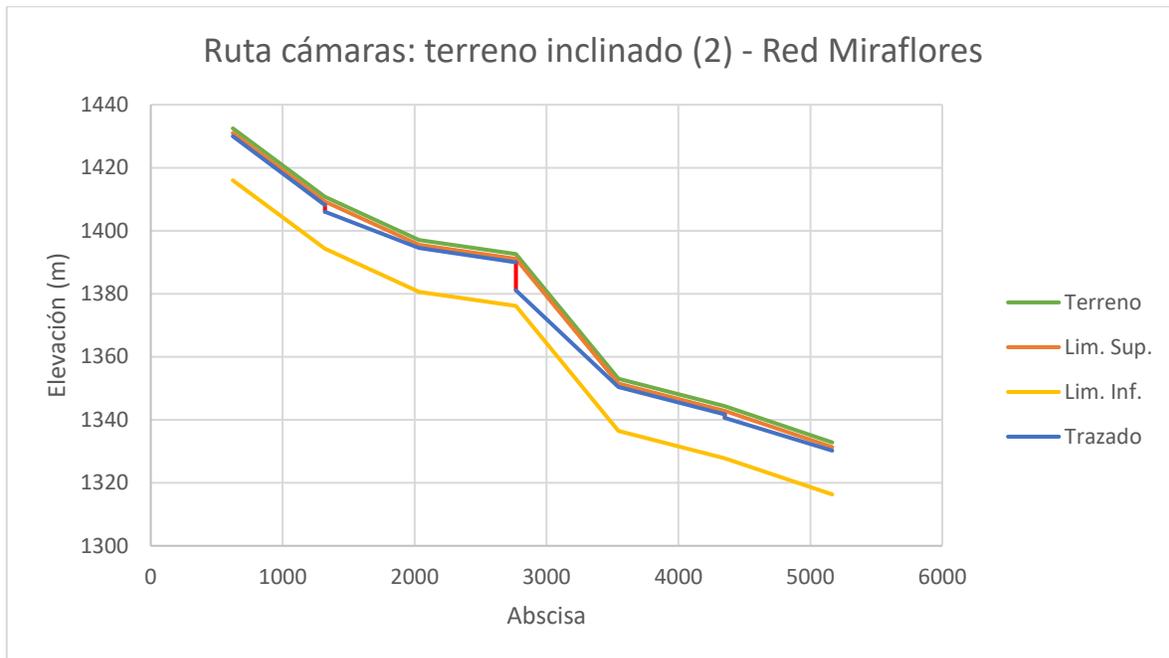


Prom	0.2368
Cámaras	
Número	3
Pozo	Altura (m)
20	2.2
22	8.9
24	1.1
Costo Cámaras (USD\$)	10951.5402
Costo total (USD\$)	445433.68

Debido a que en este terreno se presentaron cámaras de caída se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 10. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores

Terreno Inclinado (2) - Red Miraflores			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
19	20	1430.00	1408.20
20	21	1406.00	1394.48
21	22	1394.48	1390.00
22	23	1381.10	1350.38
23	24	1350.38	1341.70
24	25	1340.60	1330.22

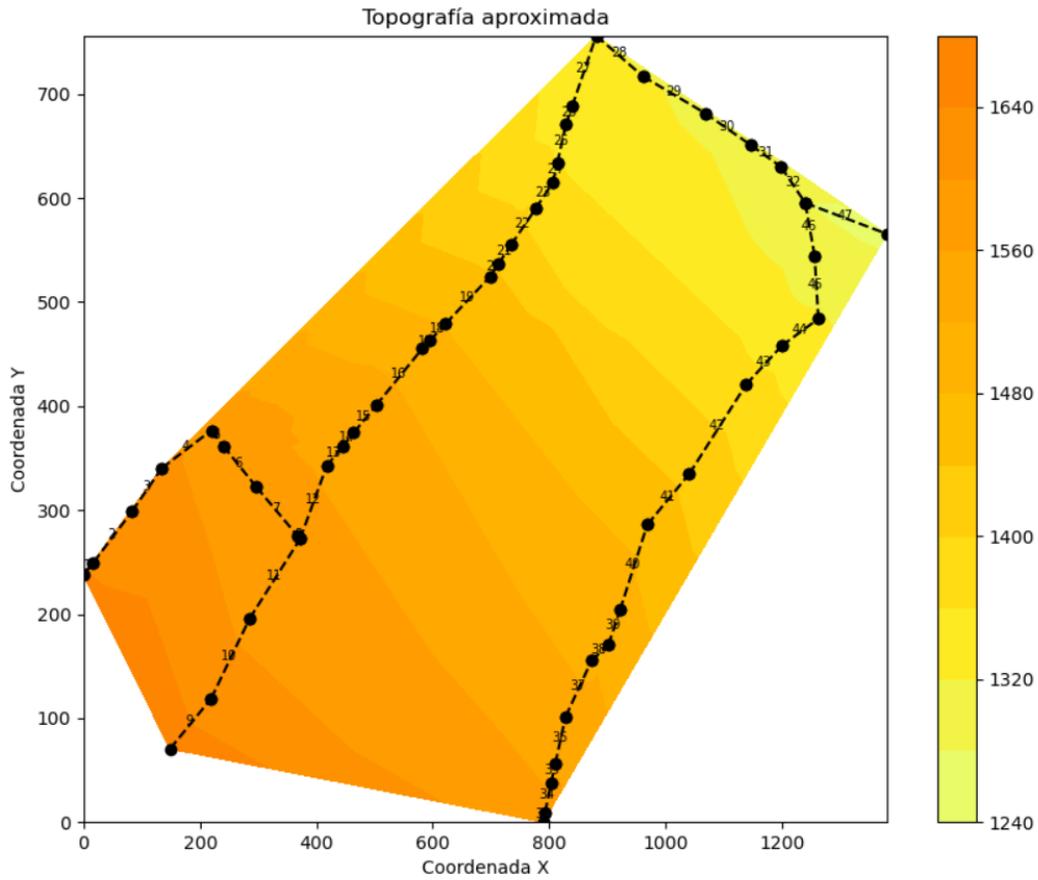


Gráfica 10. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores

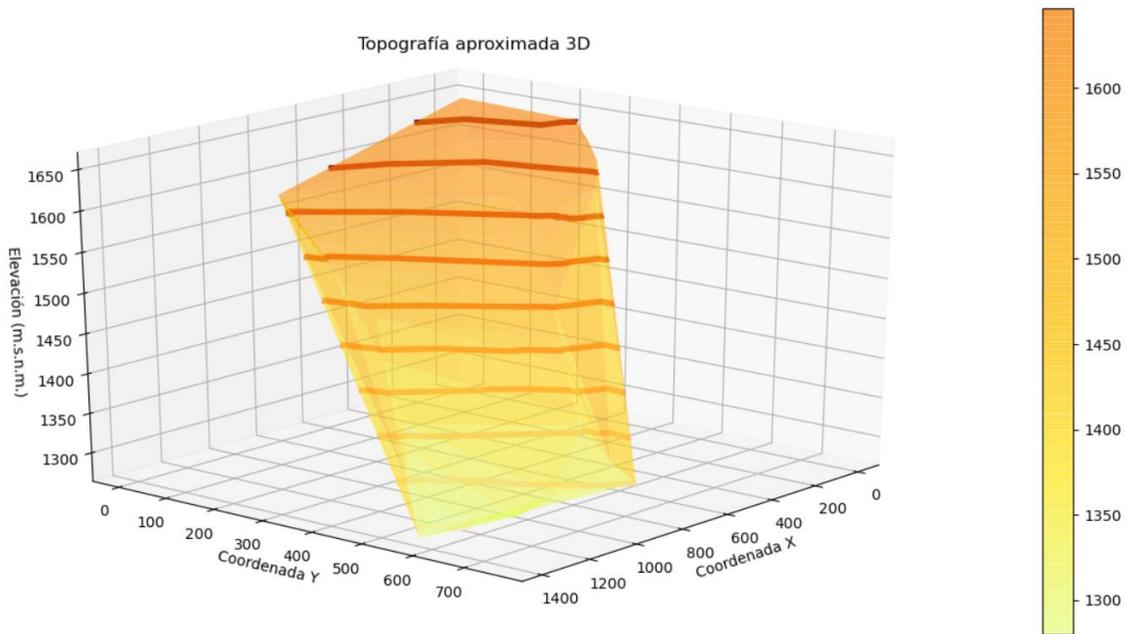
En la **Gráfica 10. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (2) - Red Miraflores** se muestra el perfil de la ruta que contiene cámaras de caída. Los límites superior e inferior son los límites establecidos por el RAS, vistos en el capítulo 2 de este documento. A su vez, se marcan en color rojo las cámaras de caída.

4.1.3 Terreno inclinado (4) – Red Miraflores

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 11. Terreno inclinado (4) - Red Miraflores: Topografía



Gráfica 12. Terreno inclinado (4) - Red Miraflores: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (4) de la red Miraflores:

Tabla 11. Resultados: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores

Red Miraflores	
Inclinado (4)	
Longitud (m)	2948.94
Costo T y E (USD\$)	503477.64
Diferencia de nivel (m)	
Max	59.26
Min	0.038
Prom	15.44
Velocidad (m/s)	
Max	10.00
Min	0.85
Prom	6.35
Pendiente	
Max	1.0371
Min	0.000678

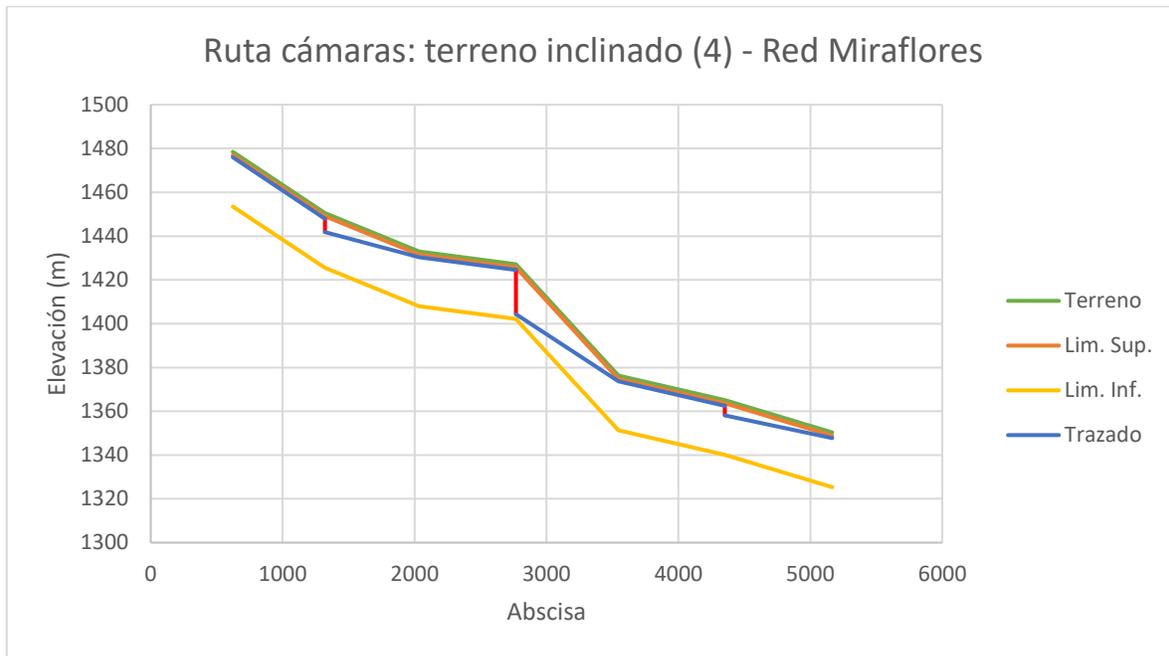


Prom	0.2941
Cámaras	
Número	3
Pozo	Altura (m)
20	6.1
22	20.2
24	4.3
Costo Cámaras (USD\$)	25927.9238
Costo total (USD\$)	529405.56

En este terreno se presentaron cámaras de caída por lo que se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 12. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores

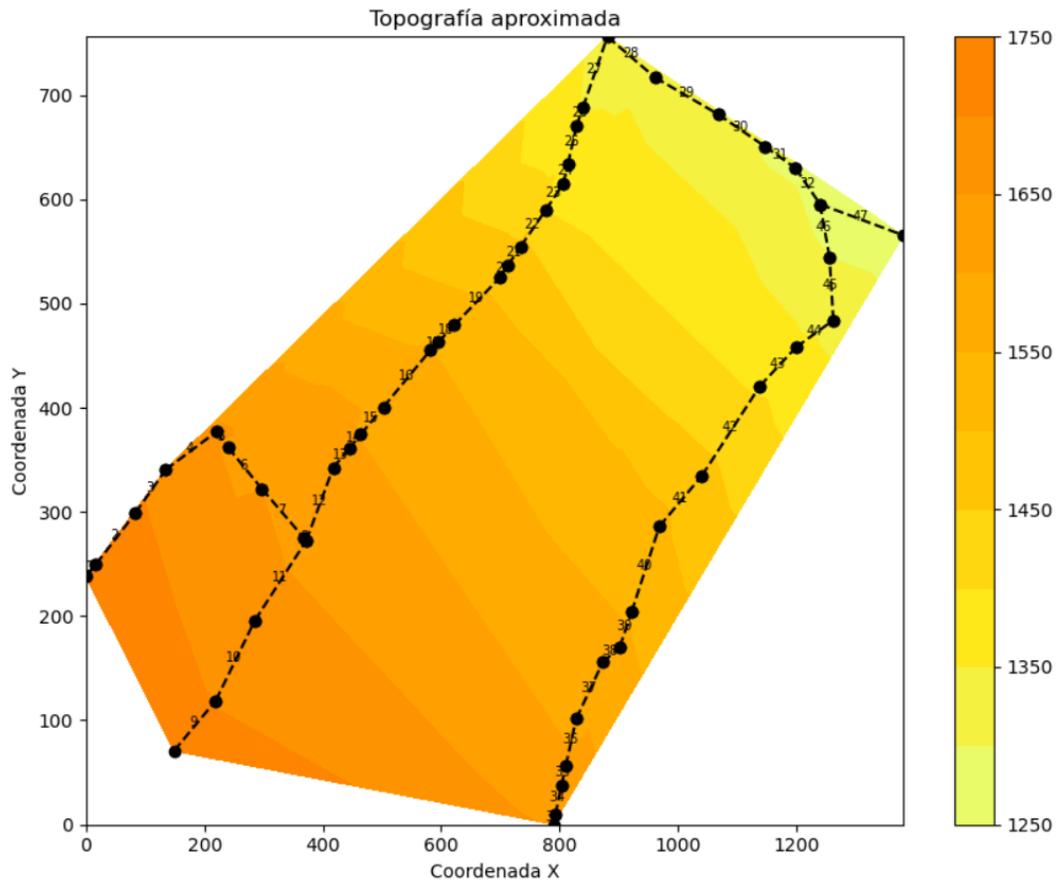
Terreno Inclinado (4) - Red Miraflores			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
19	20	1476.00	1448.00
20	21	1441.90	1430.36
21	22	1430.36	1424.60
22	23	1404.40	1373.66
23	24	1373.66	1362.50
24	25	1358.20	1347.74



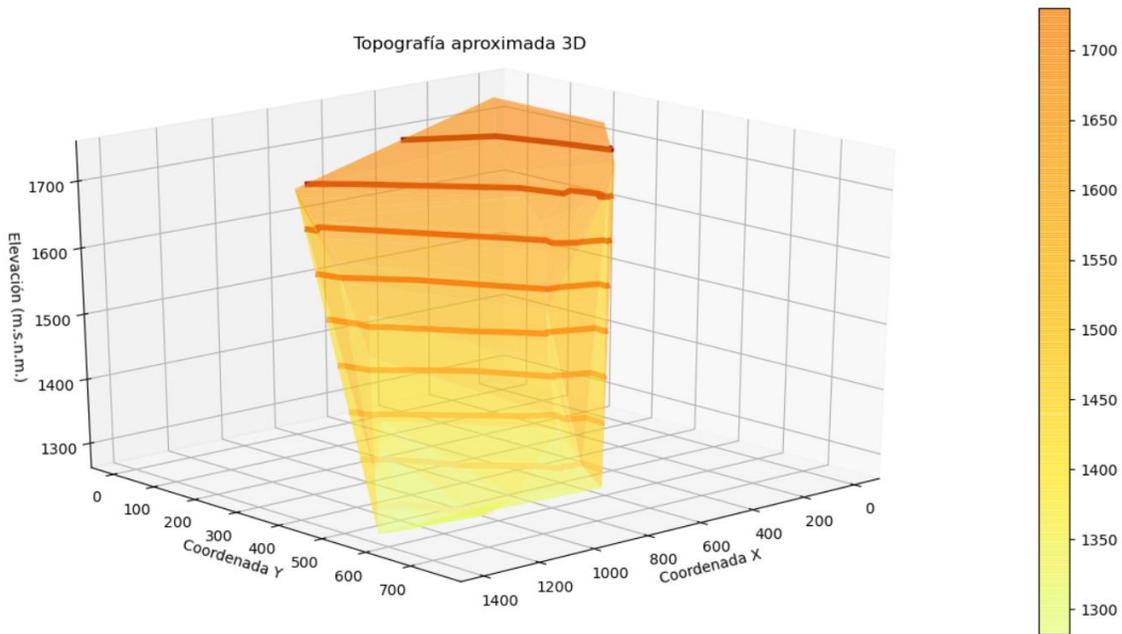
Gráfica 13. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores

4.1.4 Terreno inclinado (6) – Red Miraflores

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 14. Terreno inclinado (6) - Red Miraflores: Topografía



Gráfica 15. Terreno inclinado (6) - Red Miraflores: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (6) de la red Miraflores:

Tabla 13. Resultados: Terreno inclinado (6) - Red Miraflores

Red Miraflores	
Inclinado (6)	
Longitud (m)	3000.12
Costo T y E (USD\$)	574471.42
Diferencia de nivel (m)	
Max	72.34
Min	0.1
Prom	18.59
Velocidad (m/S)	
Max	10.00
Min	0.85
Prom	6.76
Pendiente	
Max	1.2675
Min	0.001232
Prom	0.3504

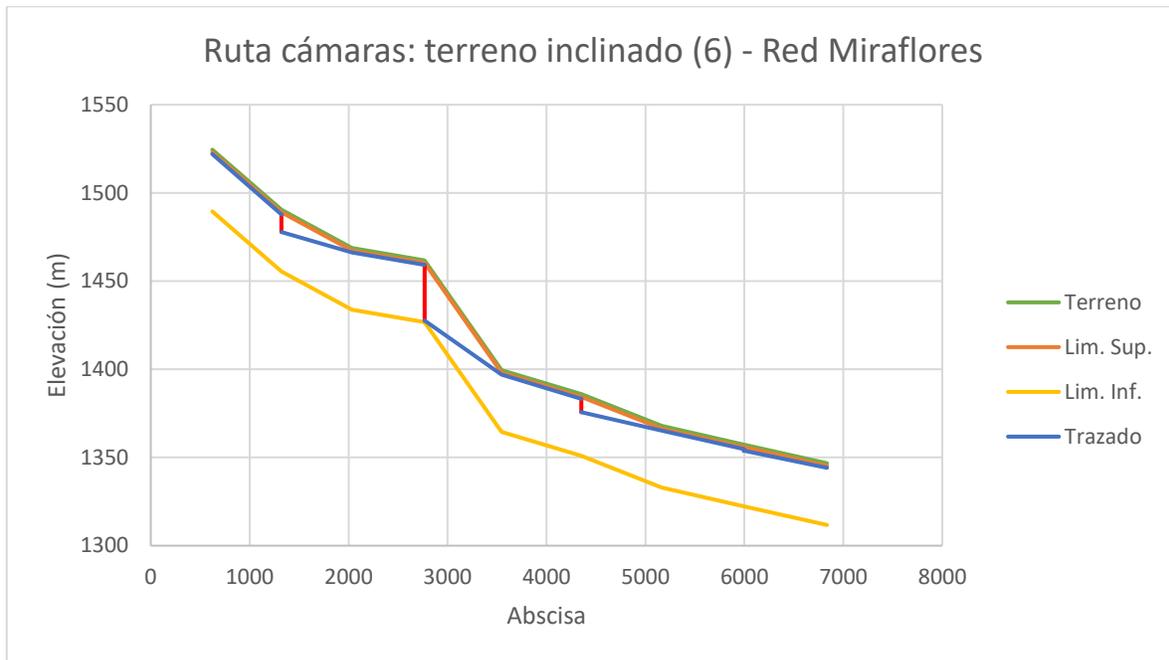


Cámaras	
Número	4
Pozo	Altura (m)
20	10
22	31.5
24	7.6
26	0.9
Costo Cámaras (USD\$)	44987.055
Costo total (USD\$)	619458.48

En este terreno se presentaron cámaras de caída por lo que se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 14. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (6) - Red Miraflores

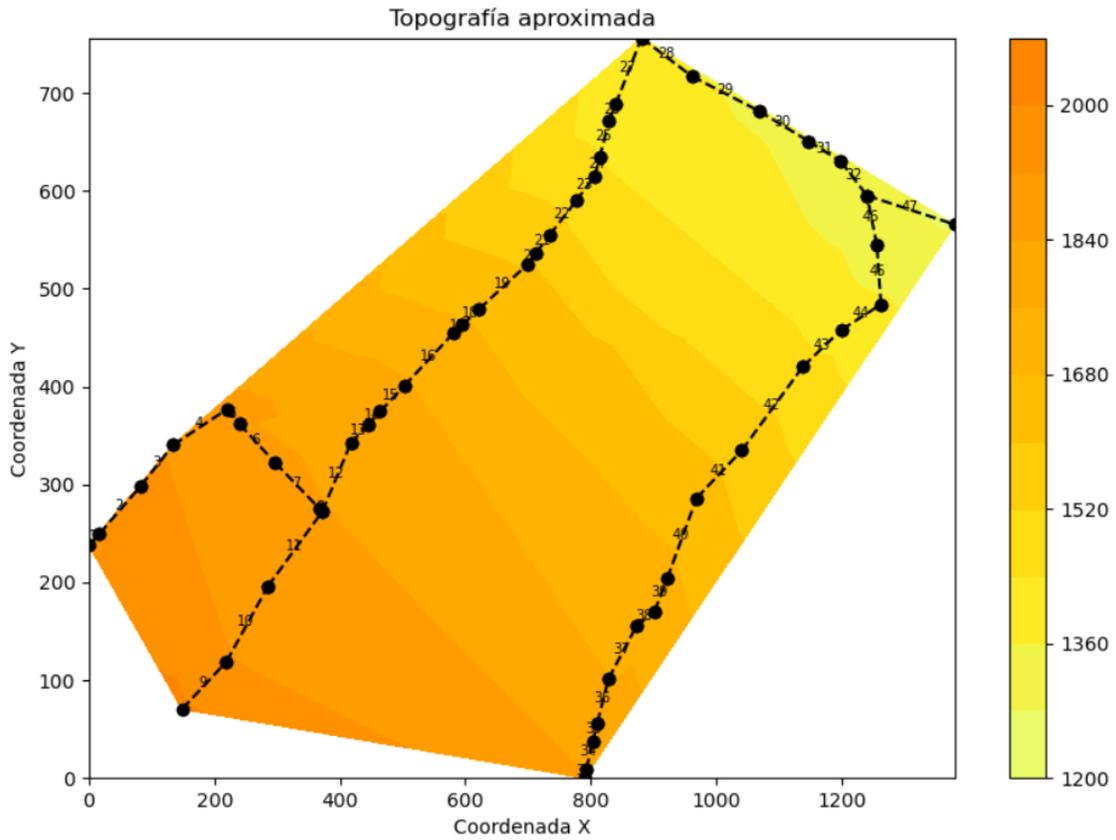
Terreno Inclinado (6) - Red Miraflores			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
19	20	1522.00	1487.80
20	21	1477.80	1466.24
21	22	1466.24	1459.20
22	23	1427.70	1396.94
23	24	1396.94	1383.30
24	25	1375.70	1365.26
25	26	1365.26	1354.70
26	27	1353.80	1344.14



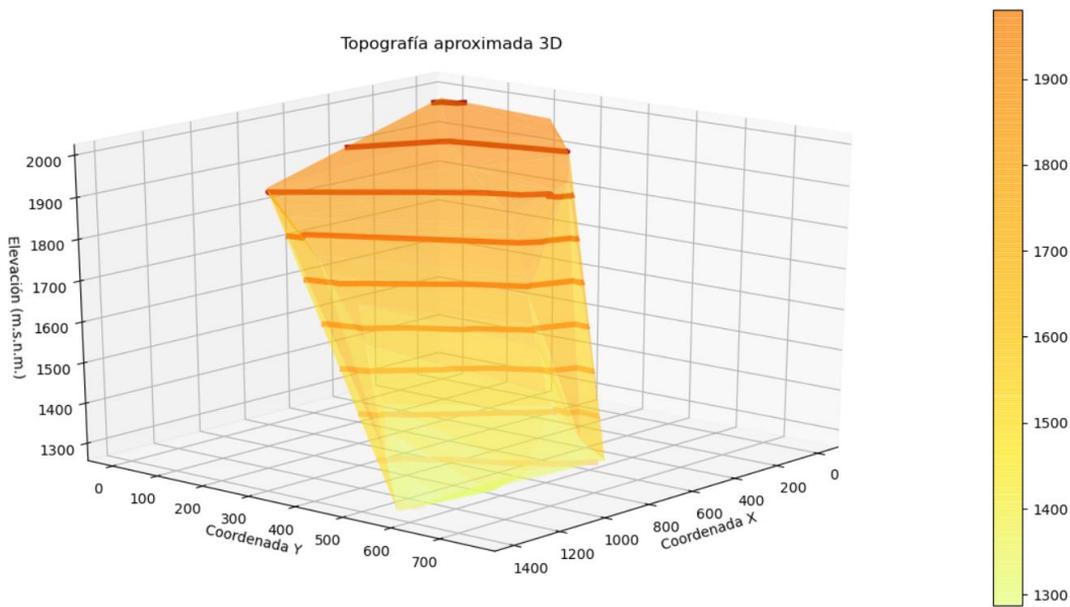
Gráfica 16. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (4) - Red Miraflores

4.1.5 Terreno inclinado (12) – Red Miraflores

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 17. Terreno inclinado (12) - Red Miraflores: Topografía



Gráfica 18. Terreno inclinado (12) - Red Miraflores: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (12) de la red Miraflores:

Tabla 15. Resultados: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores

Red Miraflores	
Inclinado (12)	
Longitud (m)	3189.95
Costo T y E (USD\$)	835209.12
Diferencia de nivel (m)	
Max	111.58
Min	0.07
Prom	27.69
Velocidad (m/s)	
Max	10.00
Min	0.85
Prom	7.52
Pendiente	
Max	1.9589
Min	0.000784
Prom	0.5076
Cámaras	

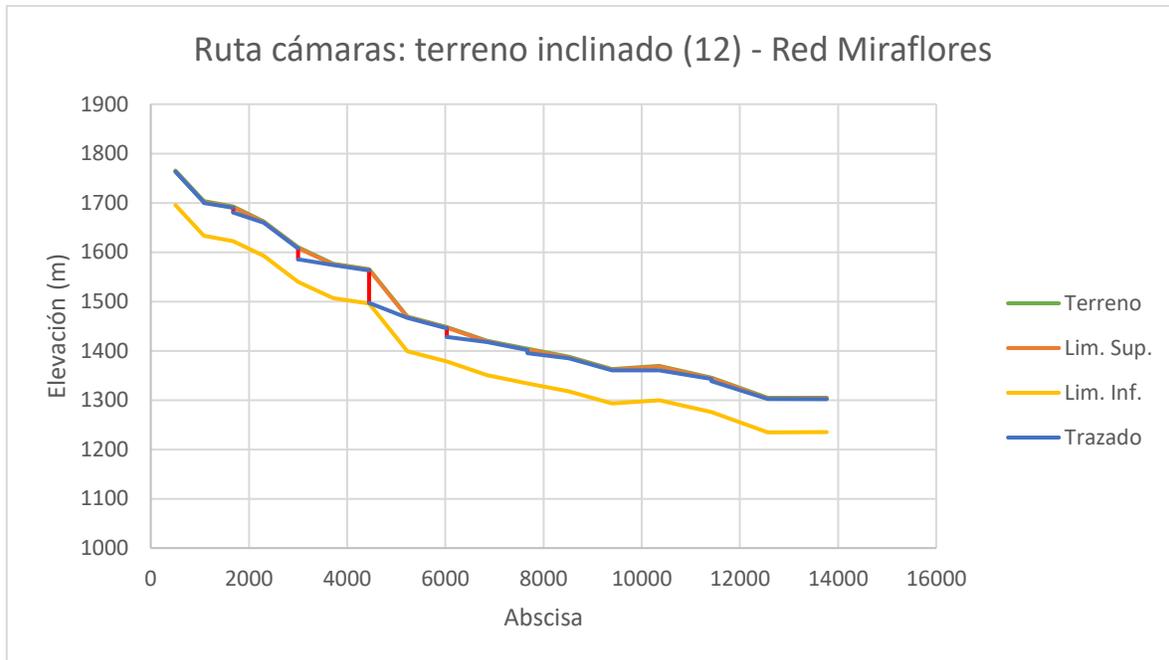


Número	7
Pozo	Altura (m)
17	0.7
18	9.2
20	21.8
22	65.6
24	17.5
26	6.6
30	4.9
Costo Cámaras (USD\$)	124789.98
Costo total (USD\$)	959999.10

En este terreno se presentaron cámaras de caída por lo que se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 16. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores

Terreno Inclinado (12) - Red Miraflores			
Tubería		Elevación (m)	
Nodo i	Nodo j	Zi	Zj
16	17	1763.02	1700.70
17	18	1700.00	1689.79
18	19	1680.59	1659.90
19	20	1659.90	1607.20
20	21	1585.40	1573.88
21	22	1573.88	1563.00
22	23	1497.40	1466.68
23	24	1466.68	1445.70
24	25	1428.20	1417.82
25	26	1417.82	1401.50
26	27	1394.90	1385.18
27	28	1385.18	1360.36
28	29	1360.36	1360.29
29	30	1360.29	1343.05
30	31	1338.15	1302.08
31	32	1302.08	1301.99



Gráfica 19. Ruta Cámaras: Terreno inclinado (12) - Red Miraflores

4.1.6 Resultados globales – Red Miraflores

A continuación, se muestran los resultados globales:

Primero, se muestra la profundidad máxima utilizada en cada diseño:

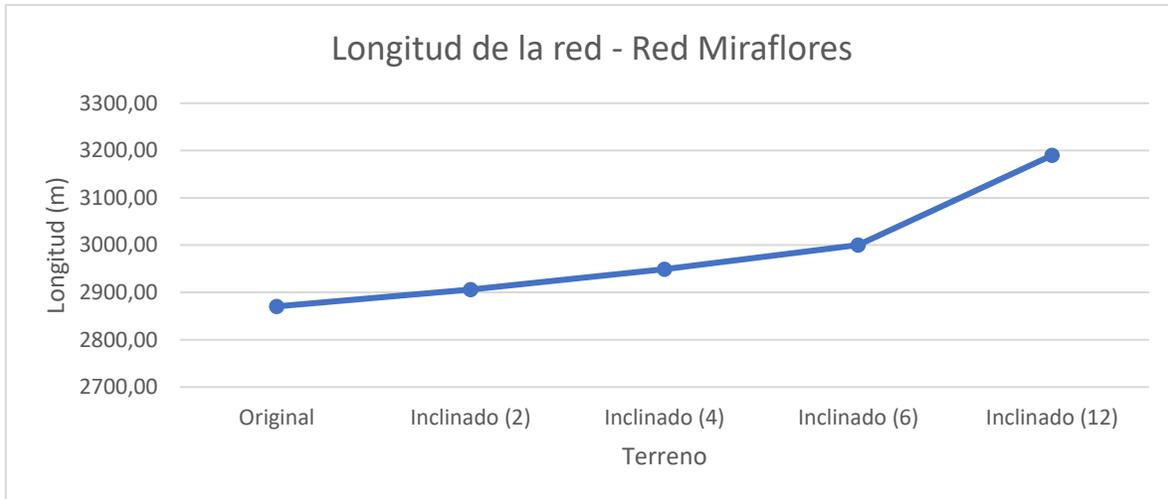
Tabla 17. Profundidad máxima - Red Miraflores

Red Miraflores	
Terreno	Profundidad Máxima (m)
Original	7.5
Inclinado (2)	15
Inclinado (4)	25
Inclinado (6)	35

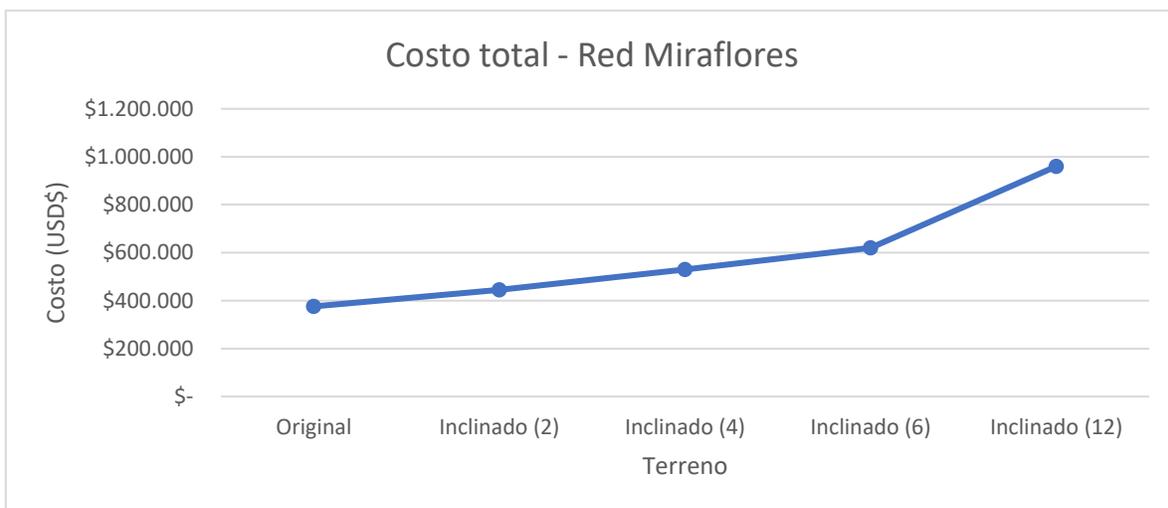


Inclinado (12)	70
----------------	----

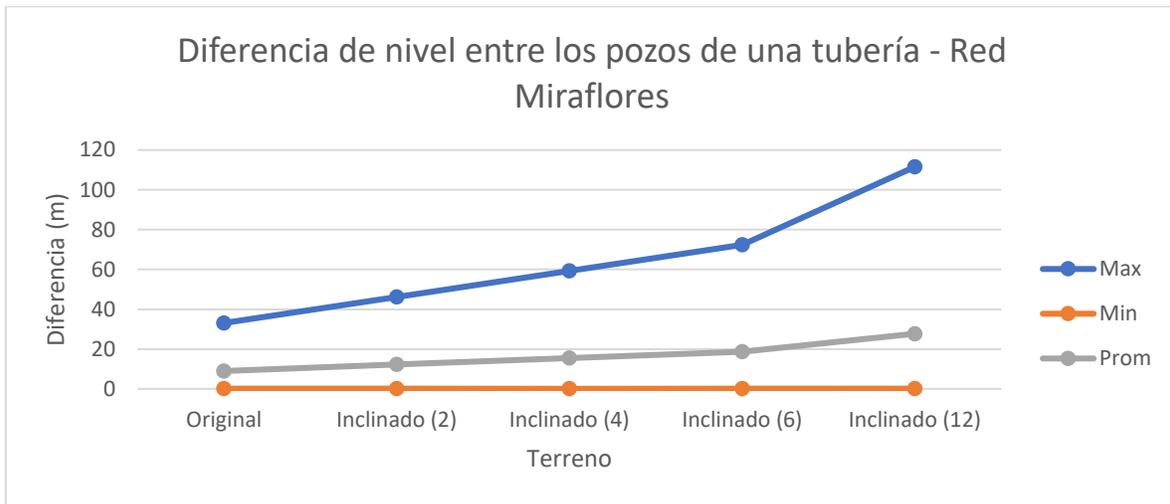
Seguidamente, se muestran los demás resultados:



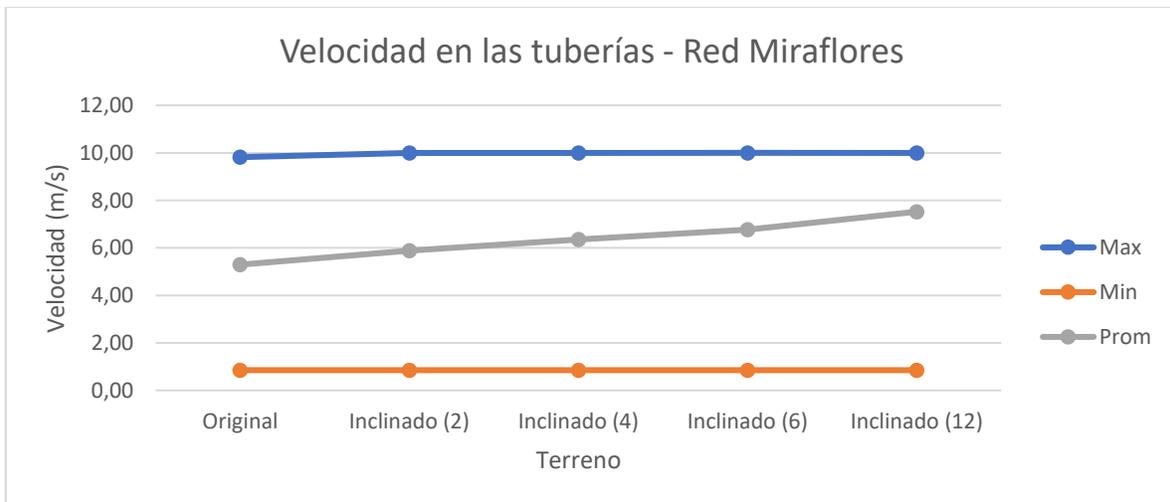
Gráfica 20. Longitud de la red - Red Miraflores



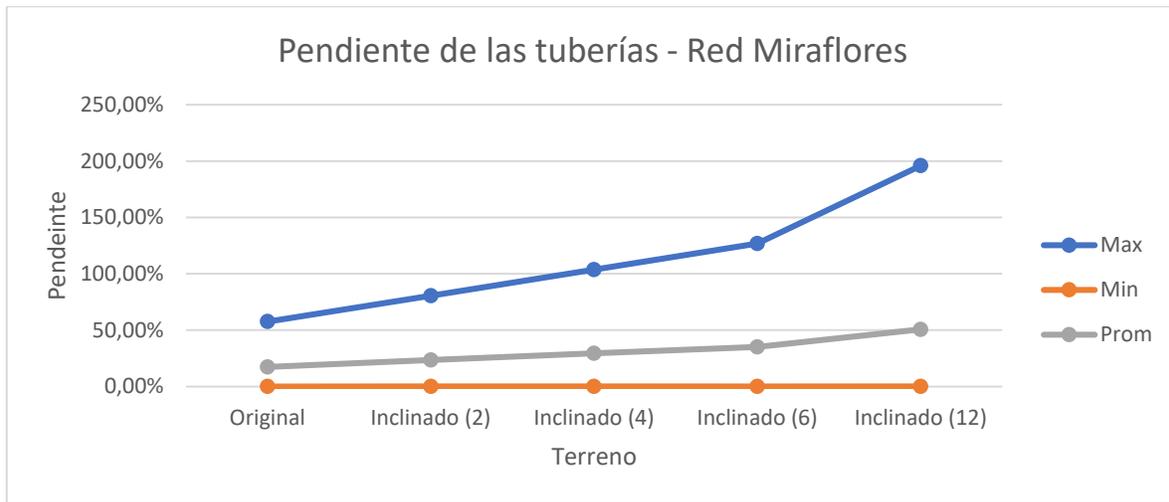
Gráfica 21. Costo total - Red Miraflores



Gráfica 22. Diferencia de nivel - Red Miraflores



Gráfica 23. Velocidad en las tuberías - Red Miraflores



Gráfica 24. Pendiente de las tuberías - Red Miraflores

Por último, se muestran los costos obtenidos a manera de tabla. Se indica el porcentaje que representan las cámaras de caída en el costo total:

Tabla 18. Costos - Red Miraflores

Red Miraflores				
Terreno	Costo T y E (USD\$)	Costo Cámaras (USD\$)	Costo total (USD\$)	Porcentaje cámaras
Original	\$ 375,914	-	\$ 375,914	0%
Inclinado (2)	\$ 434,482	\$ 10,952	\$ 445,434	2.46%
Inclinado (4)	\$ 503,478	\$ 25,928	\$ 529,406	4.90%
Inclinado (6)	\$ 574,471	\$ 44,987	\$ 619,458	7.26%
Inclinado (12)	\$ 835,209	\$ 124,790	\$ 959,999	13.00%

4.1.7 Diámetros obtenidos – Red Miraflores

Se muestran los diámetros obtenidos en los diseños realizados:

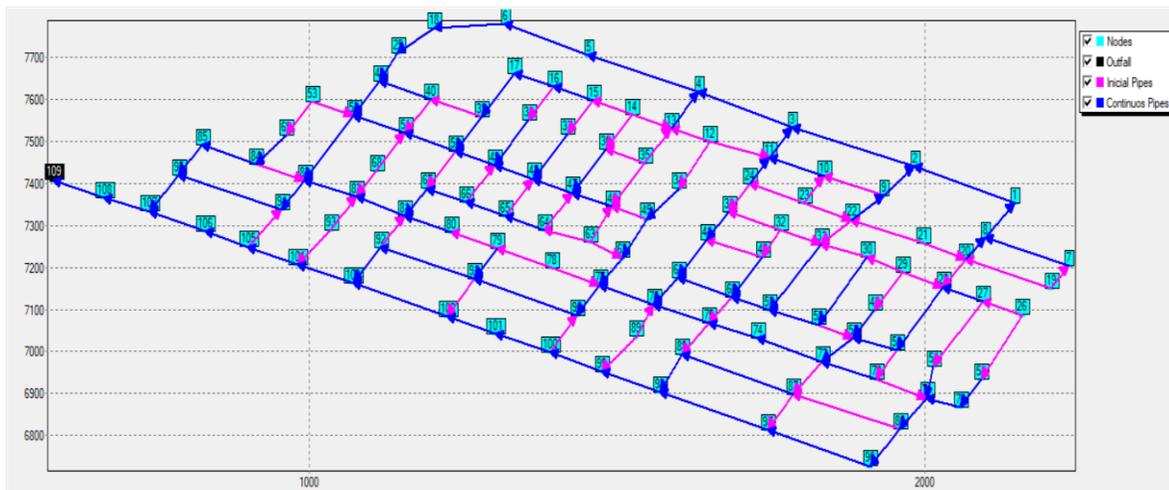


Tabla 19. Diámetros obtenidos - Red Miraflores

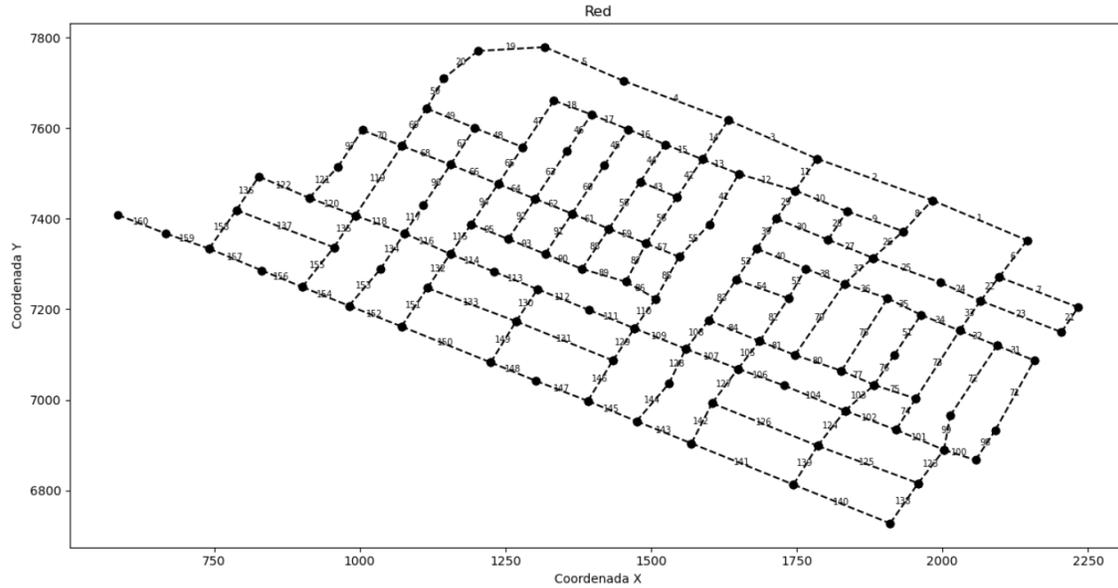
Red Miraflores			
Terreno	Diámetros Menores	Diámetros Medianos	Diámetros Grandes
Original	16	6	25
Inclinado (2)	16	6	25
Inclinado (4)	16	6	25
Inclinado (6)	16	6	25
Inclinado (12)	14	2	31

4.2 Red Chicó Sur

La red Chicó Sur consta de 109 pozos y 160 tuberías. El caudal de entrada promedio en los pozos es de $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo así un caudal de descarga de $1.517 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta red no presenta cámaras de caída.

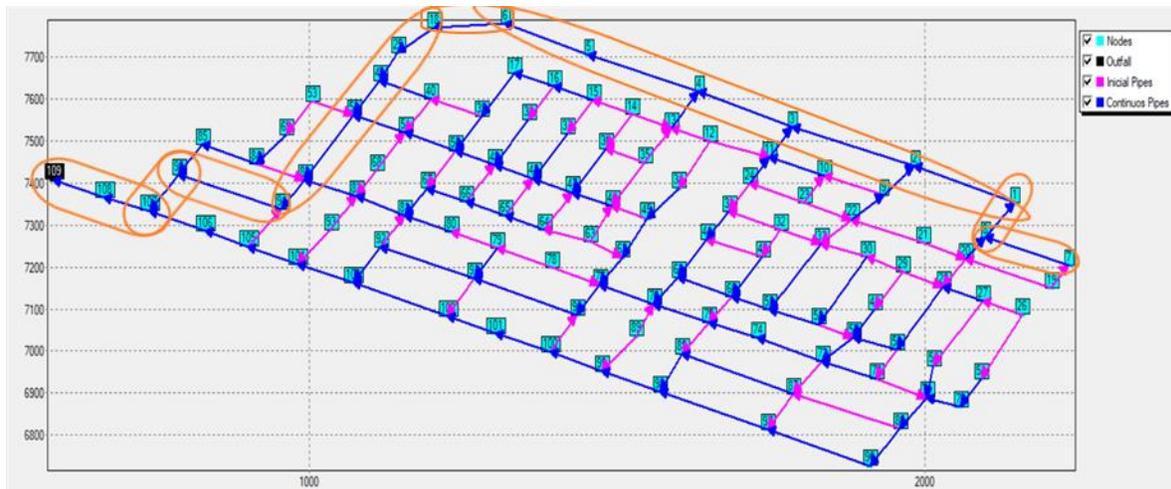


Gráfica 25. Red Chicó Sur - Modelada en Xpress



Gráfica 26. Red Chicó Sur

Debido a que en esta red no se presentaron cámaras de caída, se presenta en cambio el perfil que muestra la ruta más larga de la red (RML), este perfil se mostrará en todos los terrenos realizados. Dicha ruta se muestra a continuación:

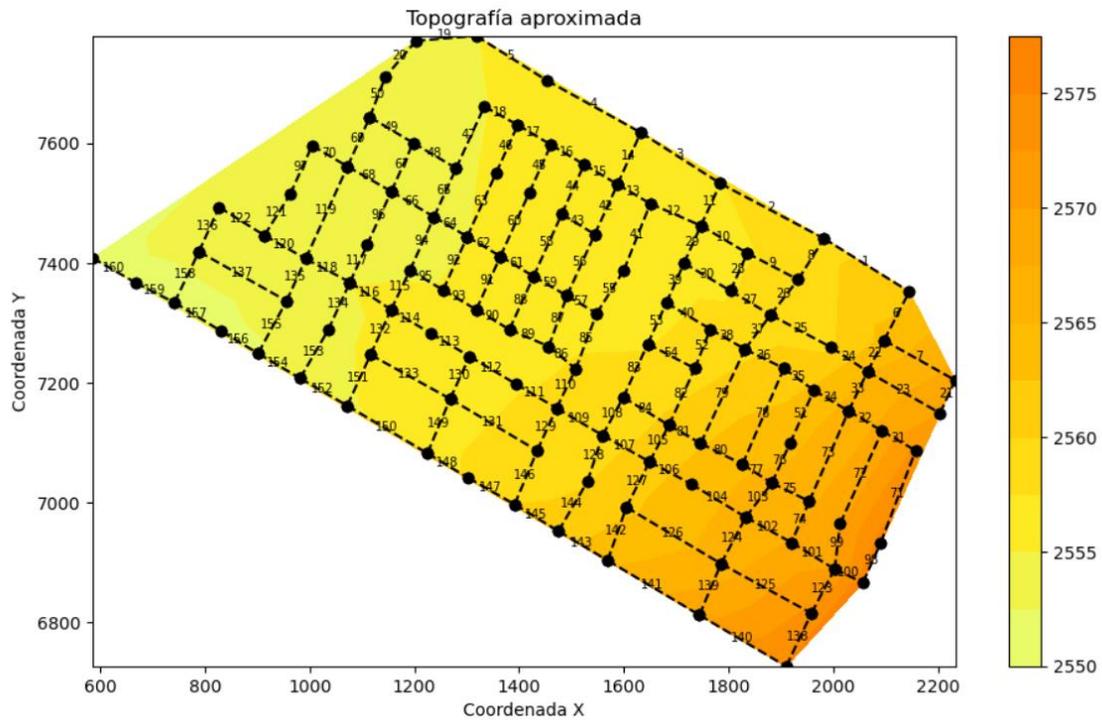


Gráfica 27. RML - Chicó Sur

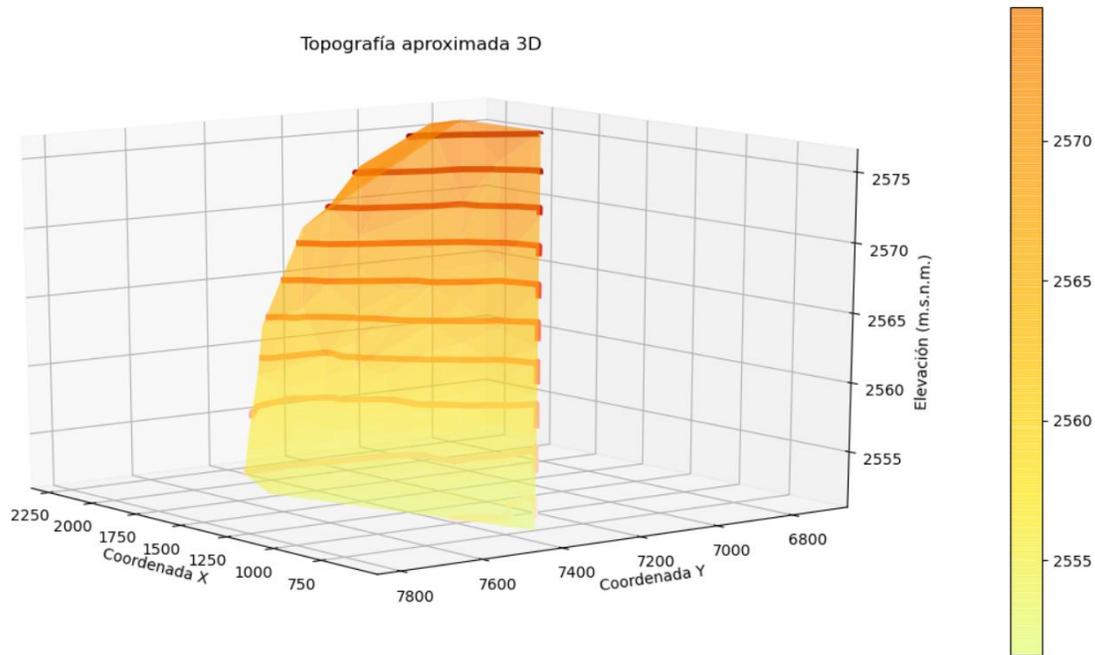


4.2.1 Terreno original – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 28. Terreno original - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 29. Terreno original - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno original de la red Chicó Sur:

Tabla 20. Resultados: Terreno original - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Original	
Longitud (m)	15947.48
Costo T y E (USD\$)	3289888.32
Diferencia de nivel (m)	
Max	6.875
Min	0.049
Prom	0.62
Velocidad (m/s)	
Max	4.78
Min	0.64
Prom	1.15
Pendiente	
Max	0.0690
Min	0.000332

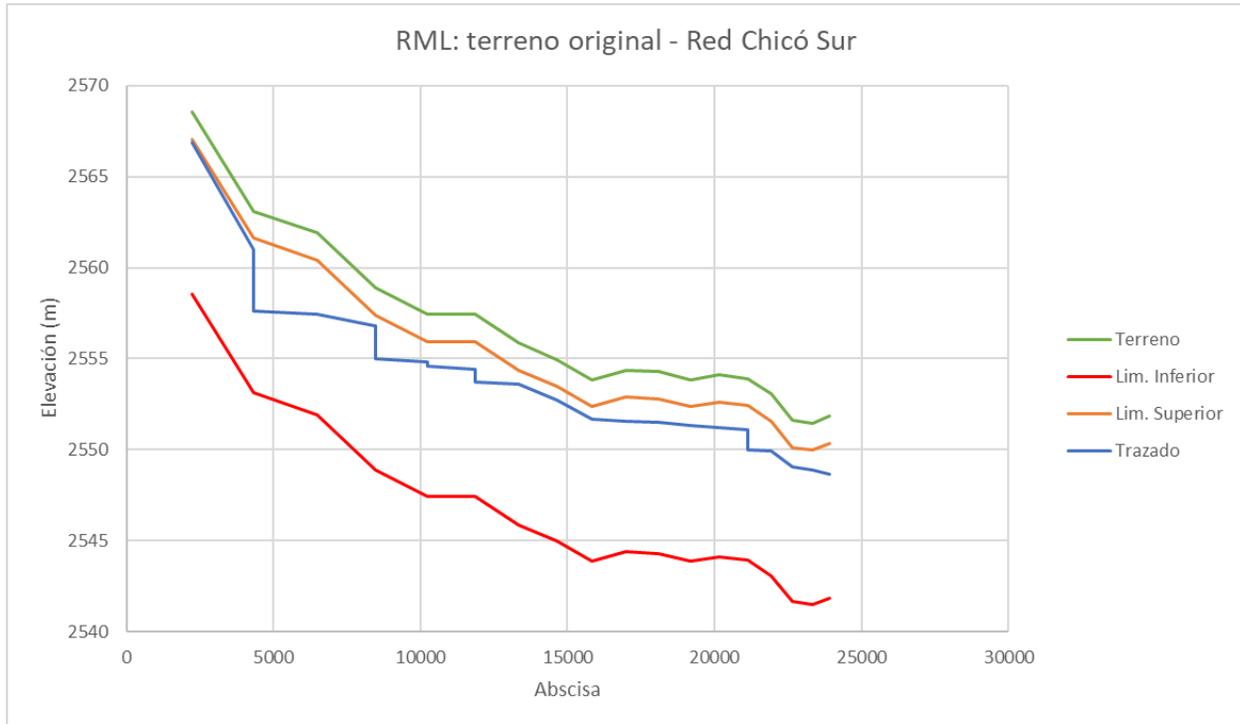


Prom	0.0062
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	3289888.32

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 21. RML: Terreno original - Red Chicó Sur

Terreno Original - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2566.86	2561.01
8	1	2557.61	2557.43
1	2	2557.43	2556.80
2	3	2555.00	2554.81
3	4	2554.61	2554.42
4	5	2553.72	2553.57
5	6	2553.57	2552.75
6	18	2552.75	2551.65
18	25	2551.65	2551.58
25	41	2551.58	2551.49
41	52	2551.49	2551.35
52	83	2551.35	2551.19
83	94	2551.19	2551.11
94	95	2550.01	2549.95
95	107	2549.95	2549.03
107	108	2549.03	2548.86
108	109	2548.86	2548.65



Gráfica 30. RML: Terreno original - Red Chicó Sur

Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

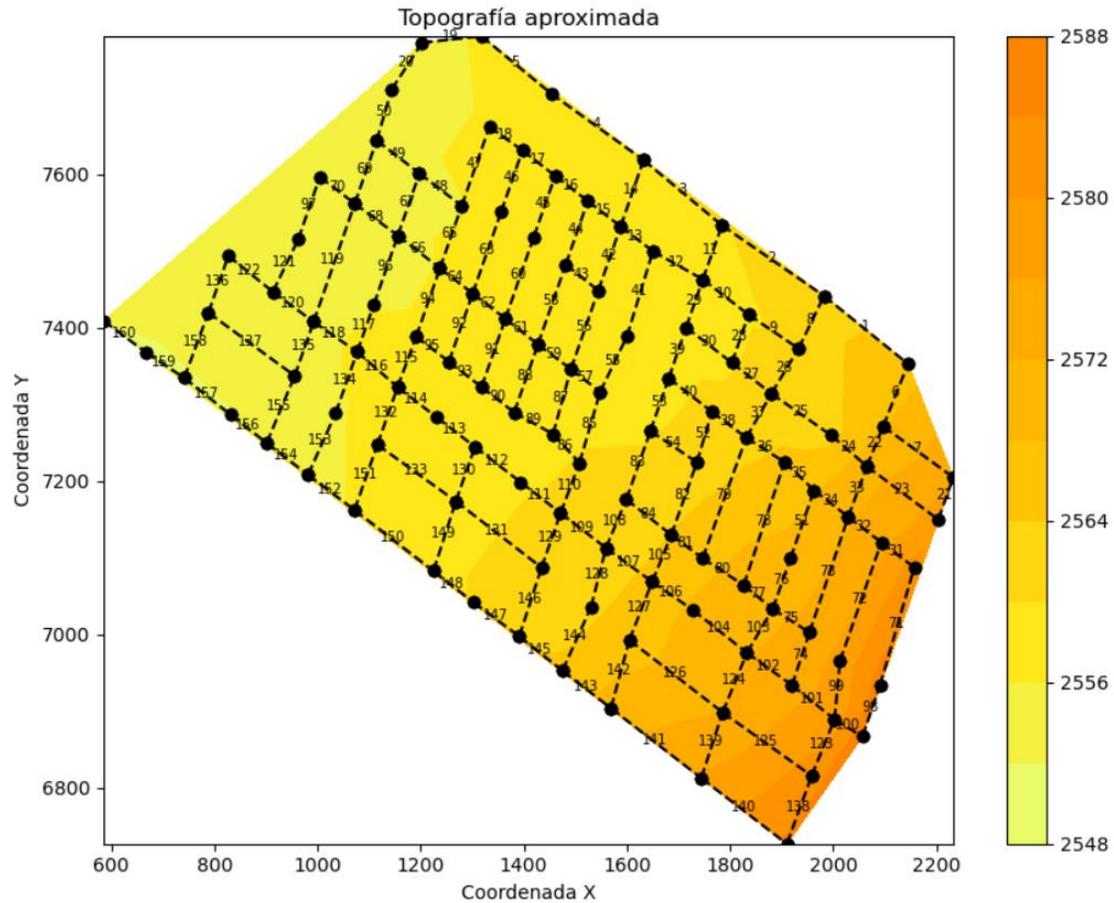
Tabla 22. Terreno original - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur					
Terreno Original	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj	
		20	8	2557.749	2557.612
	7	8	2566.86	2561.01	3.4
	8	1	2557.61	2557.43	
	1	2	2557.43	2556.8	Pozo 2
	9	2	2555.132	2554.997	1.803
	2	3	2554.997	2554.81	

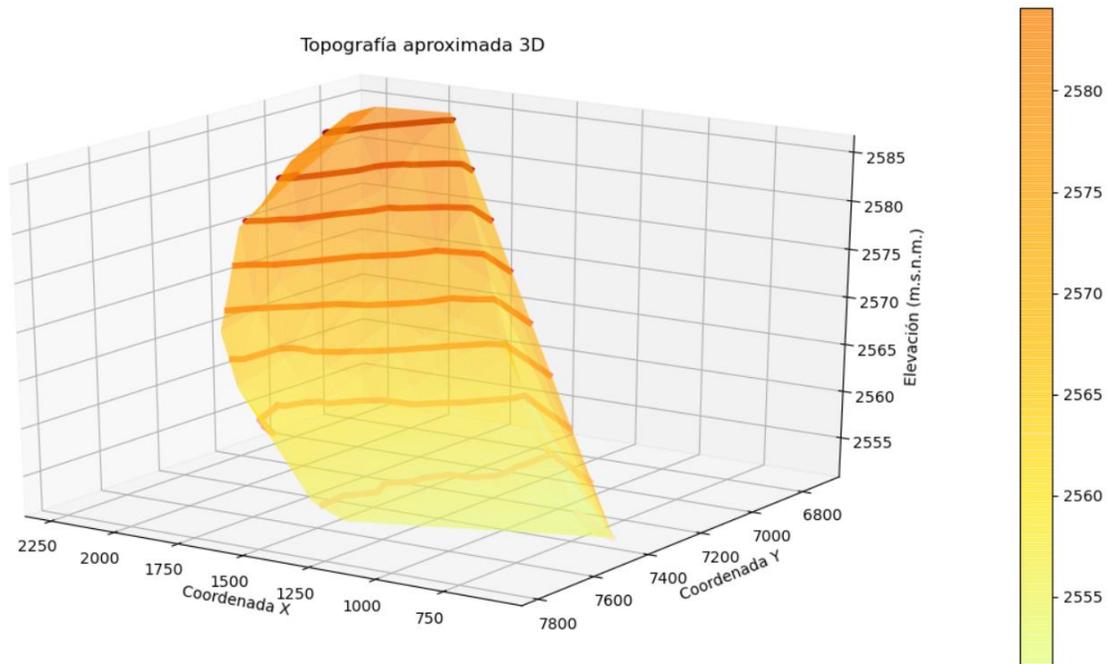


4.2.2 Terreno inclinado (2) – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 31. Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 32. Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (2) de la red Chicó Sur:

Tabla 23. Resultados: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Inclinado (2)	
Longitud (m)	15948.33
Costo T y E (USD\$)	3837211.64
Diferencia de nivel (m)	
Max	9.625
Min	0.0484
Prom	0.80
Velocidad (m/s)	
Max	5.39
Min	0.64
Prom	1.22
Pendiente	
Max	0.0967
Min	0.000345



Prom	0.0080
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	3837211.64

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 24. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur

Terreno Inclinado (2) - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2573.70	2565.67
8	1	2560.87	2560.72
1	2	2560.72	2559.77
2	3	2557.37	2557.19
3	4	2556.69	2556.50
4	5	2555.50	2555.34
5	6	2555.34	2554.15
6	18	2554.15	2552.60
18	25	2552.60	2552.54
25	41	2552.54	2552.42
41	52	2552.42	2552.30
52	83	2552.30	2552.24
83	94	2552.24	2552.19
94	95	2550.19	2550.08
95	107	2550.08	2549.10
107	108	2549.10	2548.86
108	109	2548.86	2548.71



Gráfica 33. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur

Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

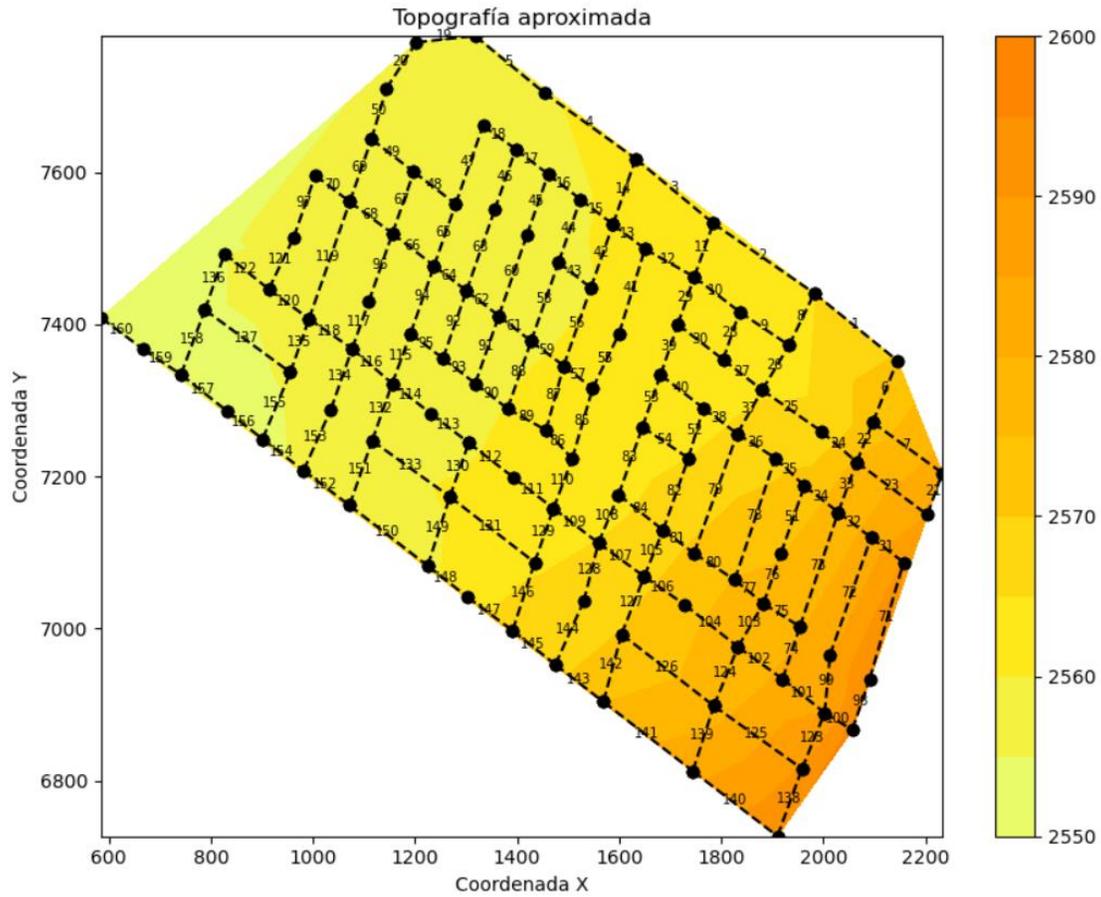
Tabla 25. Terreno inclinado (2) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur					
	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj	
Terreno inclinado (2)	20	8	2561.0034	2560.8716	Pozo 8
	7	8	2573.6988	2565.6716	4.8
	8	1	2560.8716	2560.7182	
	1	2	2560.7182	2559.7706	Pozo 2
	9	2	2557.5196	2557.3706	2.4
	2	3	2557.3706	2557.1902	

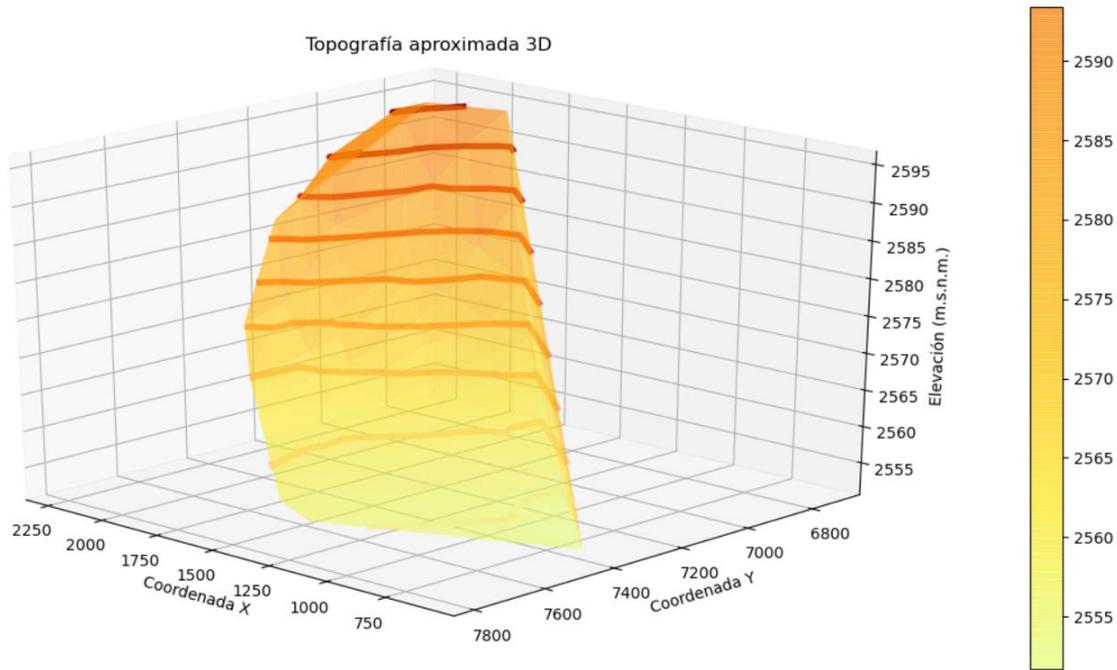


4.2.3 Terreno inclinado (4) – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 34. Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 35. Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (4) de la red Chicó Sur:

Tabla 26. Resultados: Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Inclinado (4)	
Longitud (m)	15949.46
Costo T y E (USD\$)	4412986.54
Diferencia de nivel (m)	
Max	12.375
Min	0.0276
Prom	0.99
Velocidad (m/s)	
Max	5.89
Min	0.65
Prom	1.30
Pendiente	
Max	0.1243
Min	0.000348



Prom	0.0099
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	4412986.54

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 27. RML: Terreno inclinado (4) - Red Chicó Sur

Terreno Inclinado (4) - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2580.54	2570.73
8	1	2564.13	2564.01
1	2	2564.01	2562.74
2	3	2559.64	2559.47
3	4	2558.77	2558.58
4	5	2557.28	2557.10
5	6	2556.90	2555.24
6	18	2555.24	2553.26
18	25	2553.26	2553.20
25	41	2553.20	2553.15
41	52	2553.15	2553.06
52	83	2553.06	2553.00
83	94	2553.00	2552.97
94	95	2550.47	2550.32
95	107	2550.32	2549.16
107	108	2549.16	2548.86
108	109	2548.86	2548.66



Gráfica 36. RML: Terreno inclinado (2) - Red Chicó Sur

Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

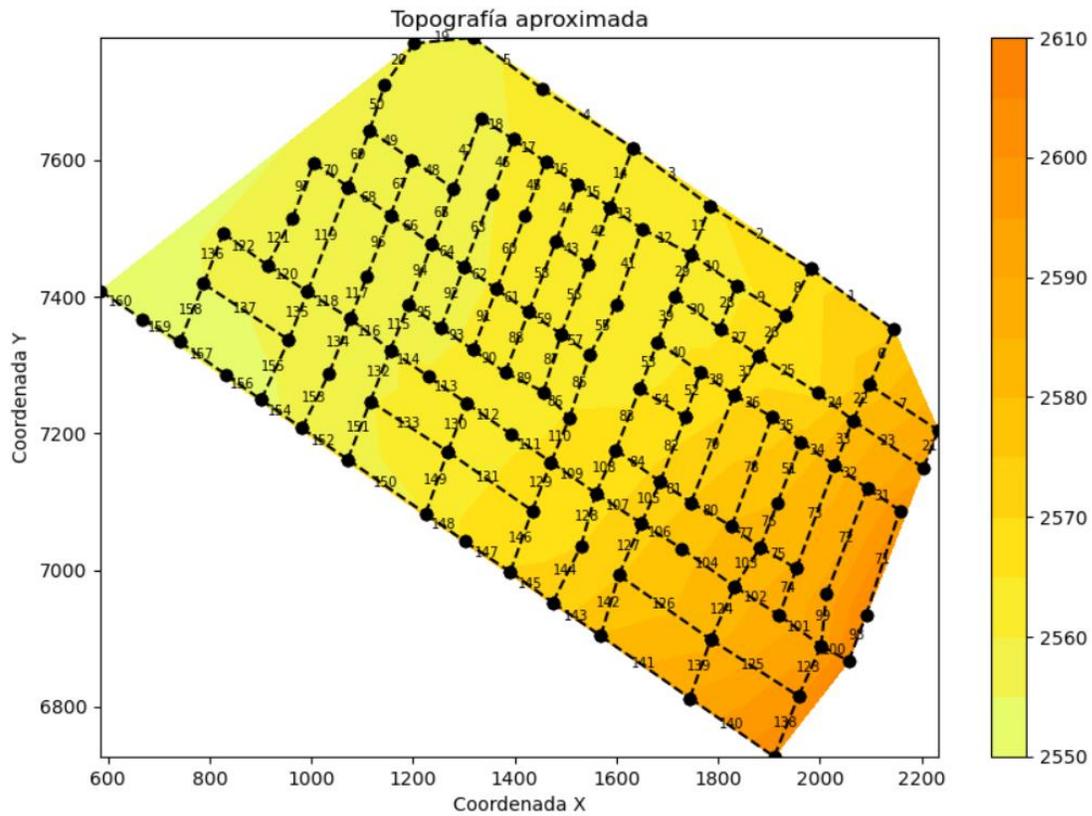
Tabla 28. Terreno inclinado (4) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur					
	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj	
Terreno inclinado (4)	20	8	2564.26	2564.13	Pozo 8
	7	8	2580.54	2570.73	6.6
	8	1	2564.13	2564.01	
	1	2	2564.01	2562.74	Pozo 2
	9	2	2559.81	2559.64	3.1
	2	3	2559.64	2559.47	

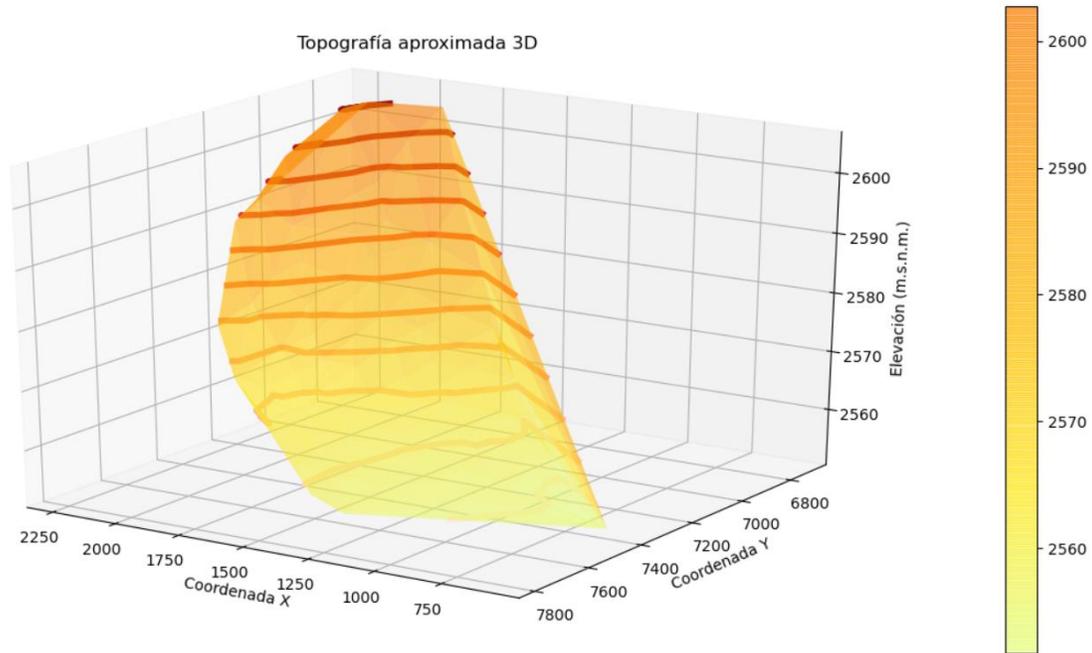


4.2.4 Terreno inclinado (6) – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 37. Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 38. Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (6) de la red Chicó Sur:

Tabla 29. Resultados: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Inclinado (6)	
Longitud (m)	15950.90
Costo T y E (USD\$)	4974830.73
Diferencia de nivel (m)	
Max	15.125
Min	0.0406
Prom	1.18
Velocidad (m/s)	
Max	6.32
Min	0.64
Prom	1.36
Pendiente	
Max	0.1519
Min	0.000377

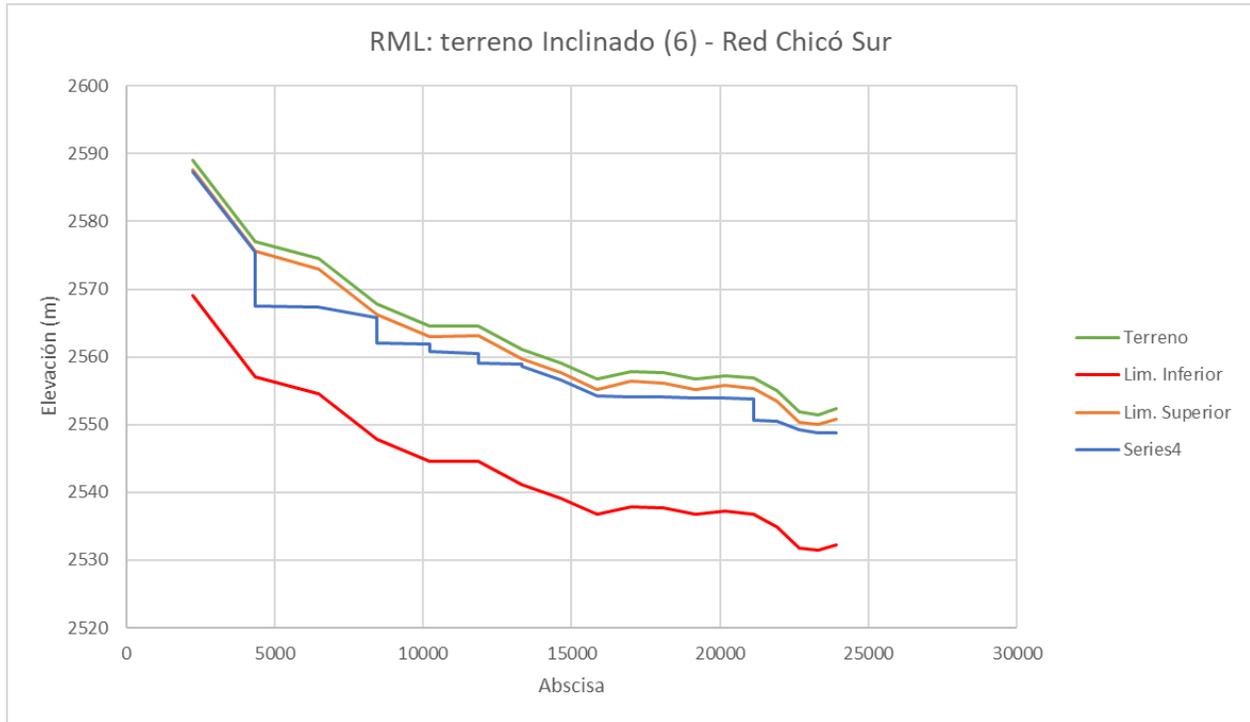


Prom	0.0117
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	4974830.73

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 30. RML: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur

Terreno Inclinado (6) - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2587.38	2575.39
8	1	2567.49	2567.39
1	2	2567.39	2565.72
2	3	2562.02	2561.85
3	4	2560.75	2560.56
4	5	2559.06	2558.87
5	6	2558.67	2556.64
6	18	2556.64	2554.21
18	25	2554.21	2554.17
25	41	2554.17	2554.08
41	52	2554.08	2554.01
52	83	2554.01	2553.95
83	94	2553.95	2553.85
94	95	2550.65	2550.55
95	107	2550.55	2549.23
107	108	2549.23	2548.86
108	109	2548.86	2548.72



Gráfica 39. RML: Terreno inclinado (6) - Red Chicó Sur

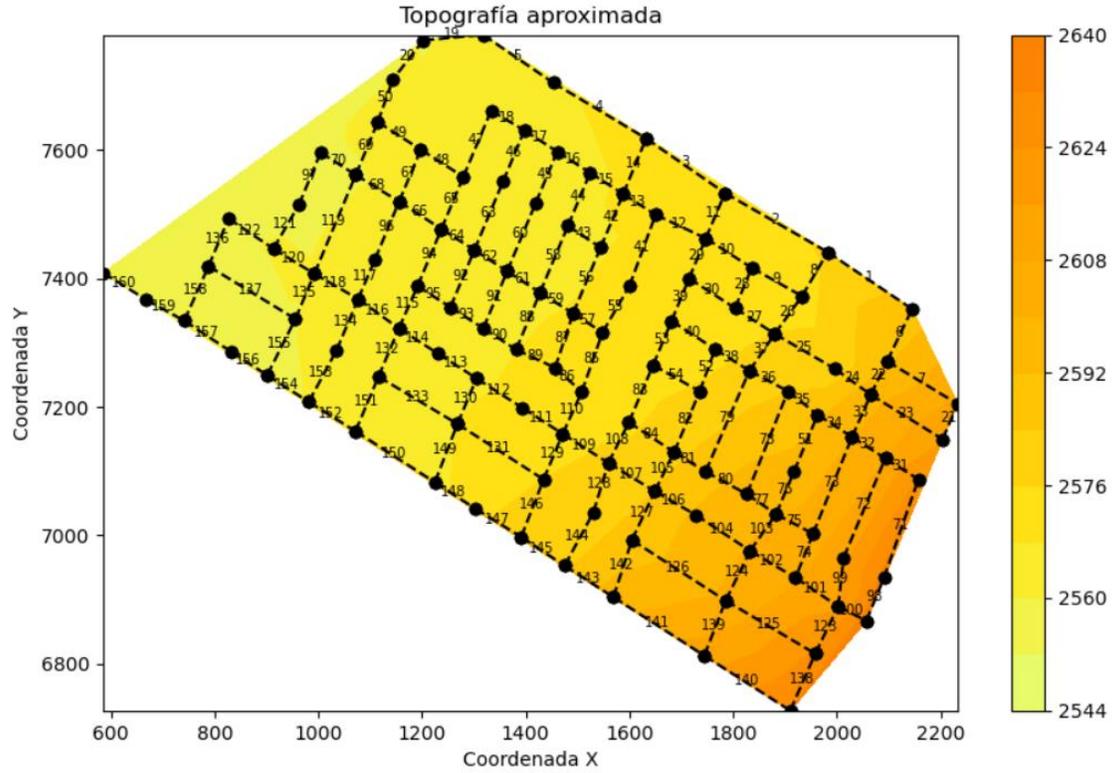
Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

Tabla 31. Terreno inclinado (6) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

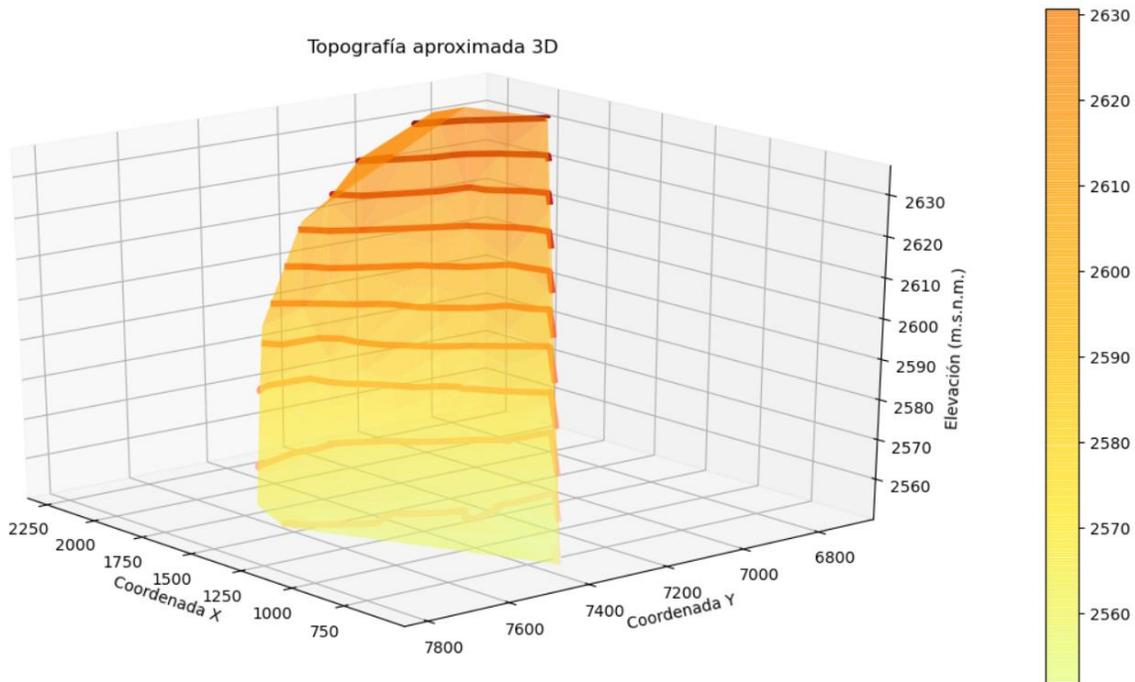
Red Chicó Sur					
	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj	
Terreno inclinado (6)	20	8	2567.61	2567.49	Pozo 8
	7	8	2587.38	2575.39	7.9
	8	1	2567.49	2567.39	
	1	2	2567.39	2565.72	Pozo 2
	9	2	2562.19	2562.02	3.7
	2	3	2562.02	2561.85	

4.2.5 Terreno inclinado (12) – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 40. Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 41. Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (12) de la red Chicó Sur:

Tabla 32. Resultados: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Inclinado (12)	
Longitud (m)	15956.94
Costo T y E (USD\$)	6649020.16
Diferencia de nivel (m)	
Max	23.375
Min	0.052
Prom	1.75
Velocidad (m/s)	
Max	7.37
Min	0.64
Prom	1.51
Pendiente	
Max	0.2348

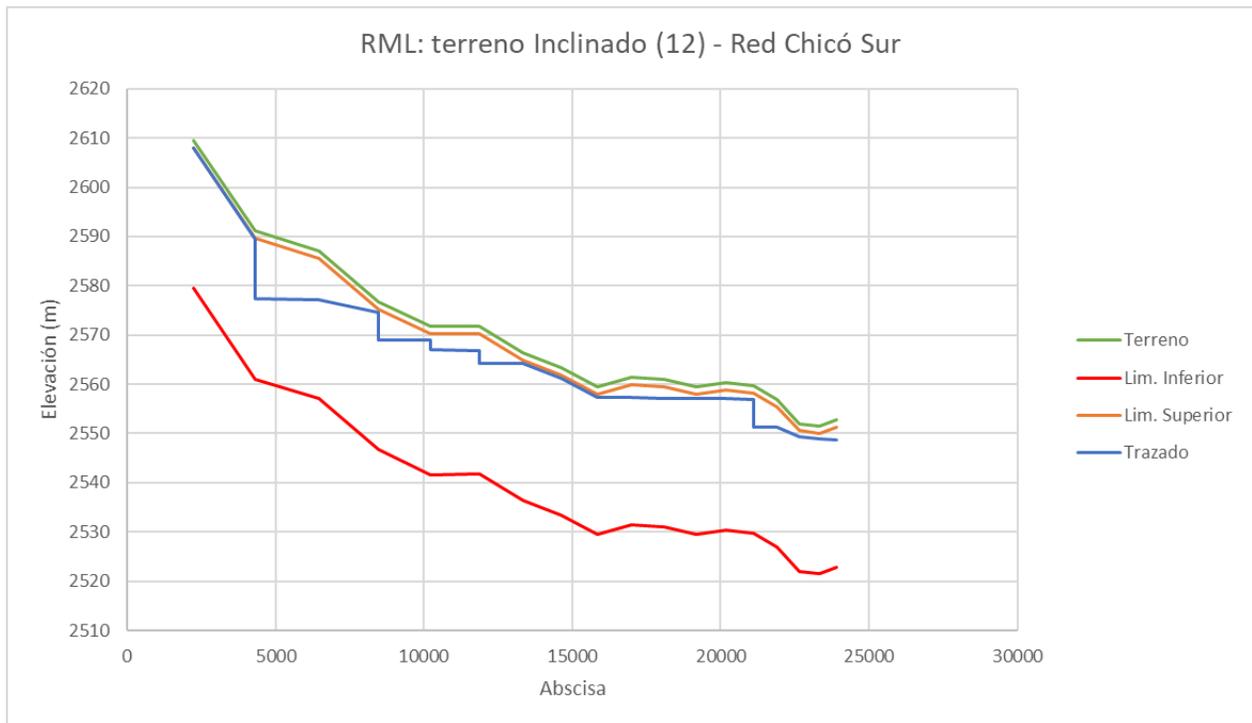


Min	0.000425
Prom	0.0174
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	6649020.16

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 33. RML: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur

Terreno Inclinado (12) - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2607.89	2589.37
8	1	2577.37	2577.25
1	2	2577.25	2574.64
2	3	2569.04	2568.89
3	4	2567.09	2566.91
4	5	2564.31	2564.16
5	6	2564.16	2561.12
6	18	2561.12	2557.37
18	25	2557.37	2557.26
25	41	2557.26	2557.17
41	52	2557.17	2557.08
52	83	2557.08	2557.00
83	94	2557.00	2556.88
94	95	2551.38	2551.25
95	107	2551.25	2549.43
107	108	2549.43	2548.86
108	109	2548.86	2548.68



Gráfica 42. RML: Terreno inclinado (12) - Red Chicó Sur

Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

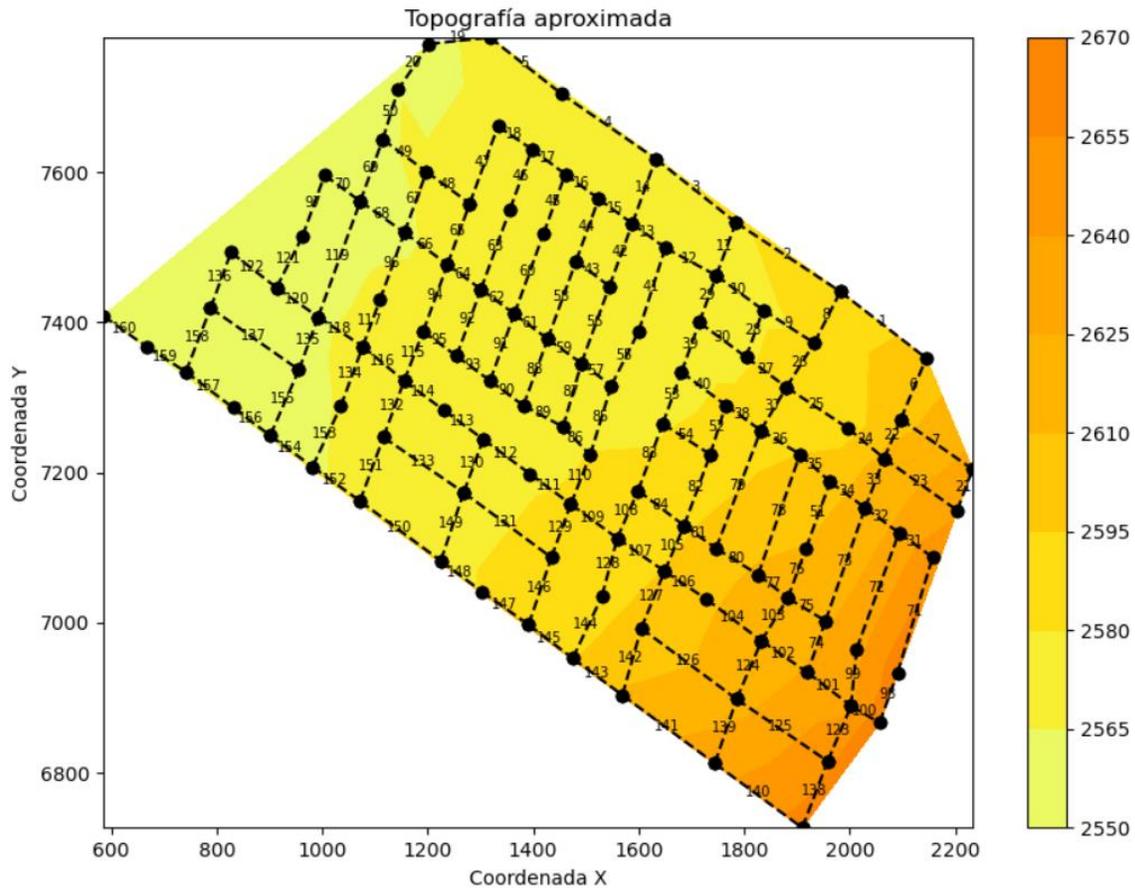
Tabla 34. Terreno inclinado (12) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur					
	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj	
Terreno inclinado (12)	20	8	2577.48	2577.37	Pozo 8
	7	8	2607.89	2589.37	12
	8	1	2577.37	2577.25	
	1	2	2577.25	2574.64	Pozo 2
	9	2	2569.26	2569.04	5.6
	2	3	2569.04	2568.89	

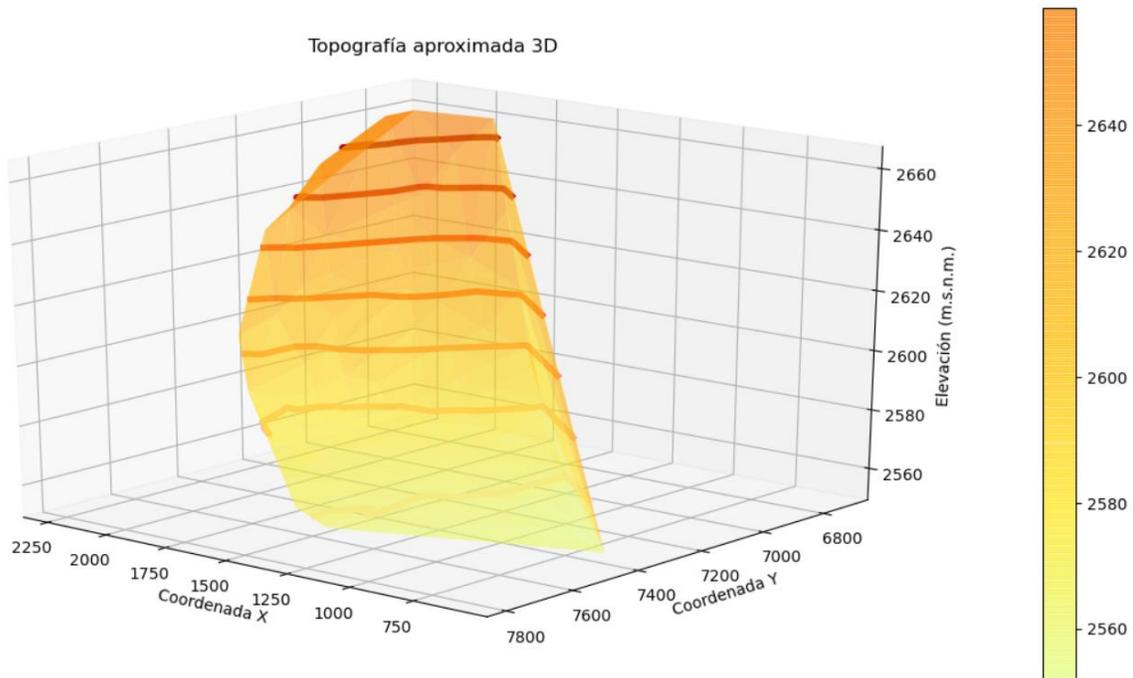


4.2.6 Terreno inclinado (18) – Red Chicó Sur

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 43. Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur: Topografía



Gráfica 44. Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (18) de la red Chicó Sur:

Tabla 35. Resultados: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Inclinado (18)	
Longitud (m)	15965.50
Costo T y E (USD\$)	8344605.09
Diferencia de nivel (m)	
Max	31.625
Min	0.0372
Prom	2.32
Velocidad (m/s)	
Max	8.20
Min	0.65
Prom	1.62
Pendiente	
Max	0.3176

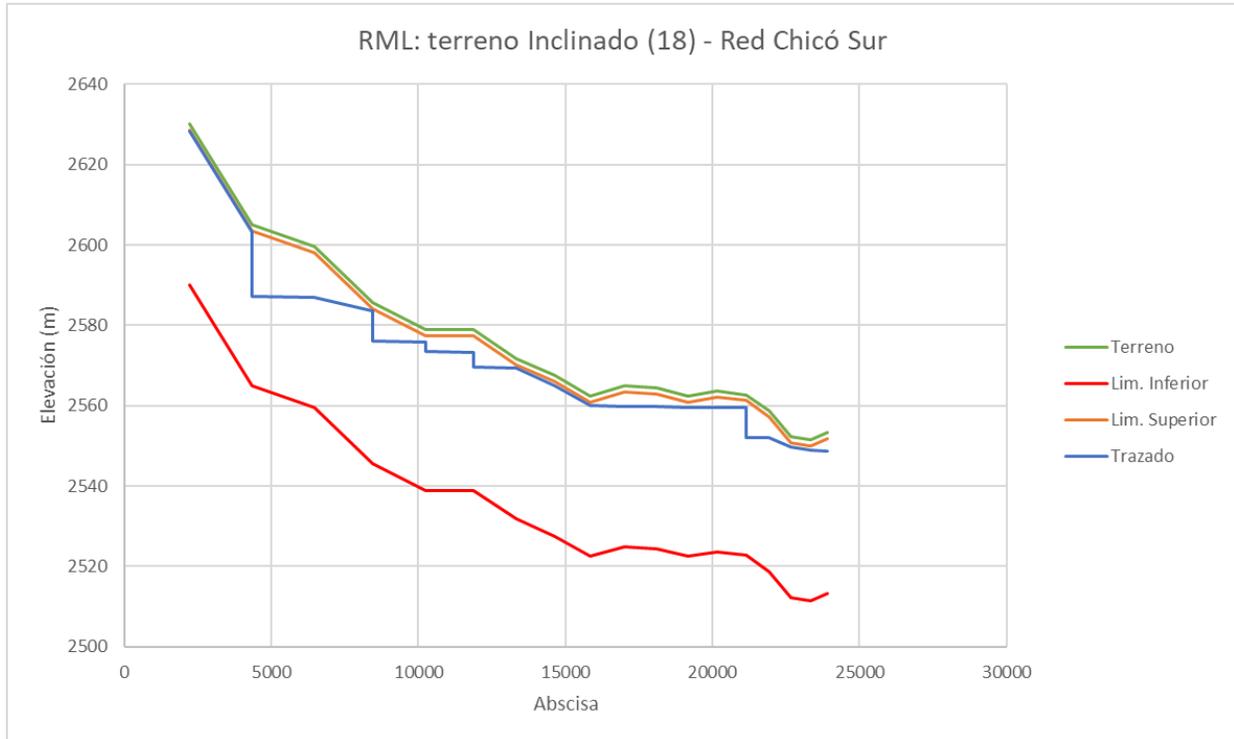


Min	0.000349
Prom	0.0231
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	8344605.09

Se muestra el perfil que contiene la ruta más larga (RML) en este terreno:

Tabla 36. RML: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur

Terreno Inclinado (18) - Red Chicó Sur			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
7	8	2628.41	2603.35
8	1	2587.15	2587.02
1	2	2587.02	2583.56
2	3	2576.06	2575.82
3	4	2573.42	2573.26
4	5	2569.56	2569.45
5	6	2569.25	2565.01
6	18	2565.01	2559.93
18	25	2559.93	2559.86
25	41	2559.86	2559.76
41	52	2559.76	2559.64
52	83	2559.64	2559.56
83	94	2559.56	2559.52
94	95	2552.12	2552.05
95	107	2552.05	2549.63
107	108	2549.63	2548.86
108	109	2548.86	2548.65



Gráfica 45. RML: Terreno inclinado (18) - Red Chicó Sur

Como es visible se encontraron, aún sin la existencia de cámaras de caída, distintas elevaciones para un mismo pozo en la RML, esto sucede en muchos pozos a través de toda la red. Para ejemplificar lo anterior se presenta lo encontrado de los pozos 2 y 8:

Tabla 37. Terreno inclinado (18) - Distintas elevaciones - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur					
	Tubería		Elevación (m)		Diferencia de elevación (m)
	Pozo i	Pozo j	Z _i	Z _j	
Terreno inclinado (18)	20	8	2587.34	2587.15	Pozo 8
	7	8	2628.41	2603.35	16.2
	8	1	2587.15	2587.02	
	1	2	2587.02	2583.56	Pozo 2
	9	2	2576.22	2576.06	7.5



	2	3	2576.06	2575.82	
--	---	---	---------	---------	--

4.2.7 Resultados globales – Red Chicó Sur

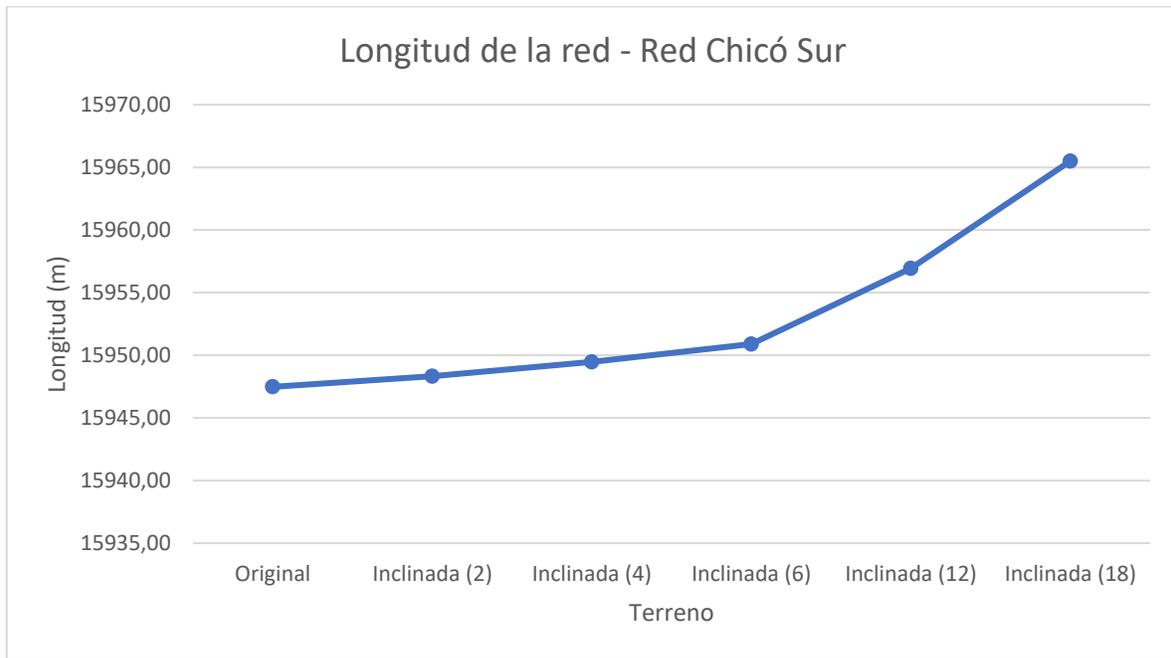
A continuación, se muestran los resultados globales:

Primero, se muestra la profundidad máxima utilizada en cada diseño:

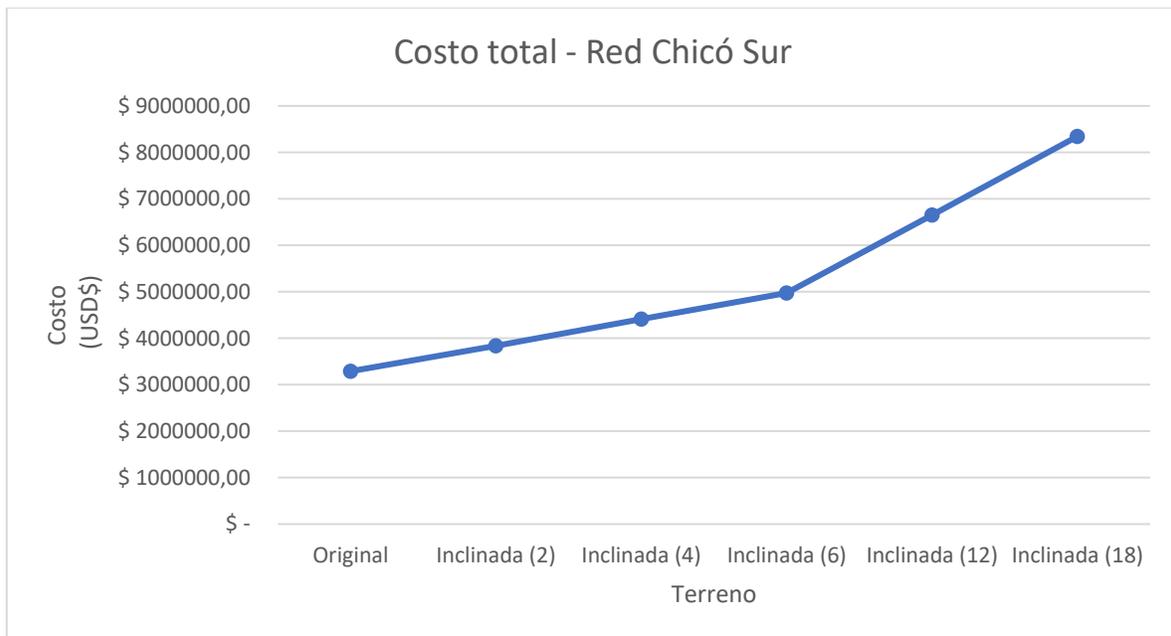
Tabla 38. Profundidad máxima - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur	
Terreno	Profundidad Máxima (m)
Original	10
Inclinado (2)	14
Inclinado (4)	16
Inclinado (6)	20
Inclinada (12)	30
Inclinada (18)	40

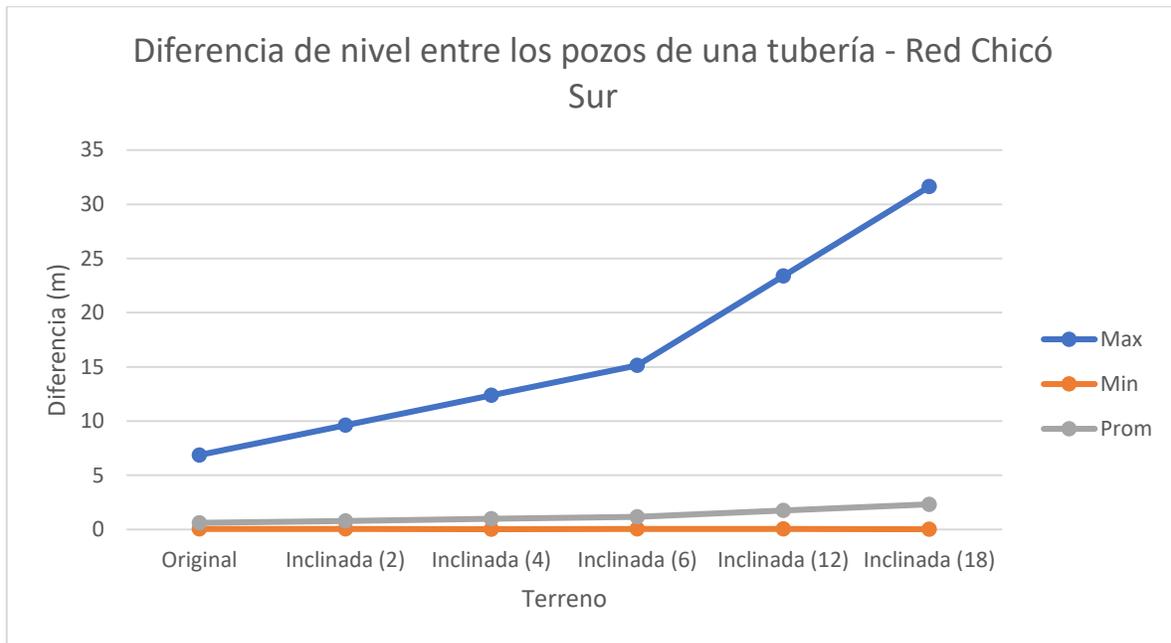
Seguidamente, se muestran los demás resultados:



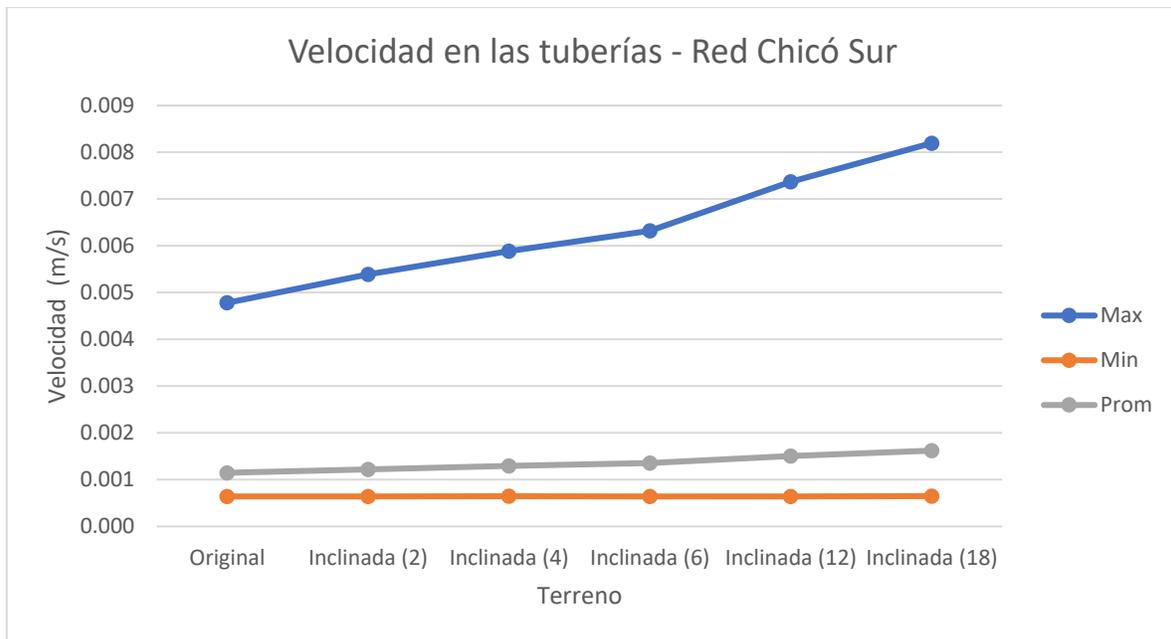
Gráfica 46. Longitud de la red - Red Chicó Sur



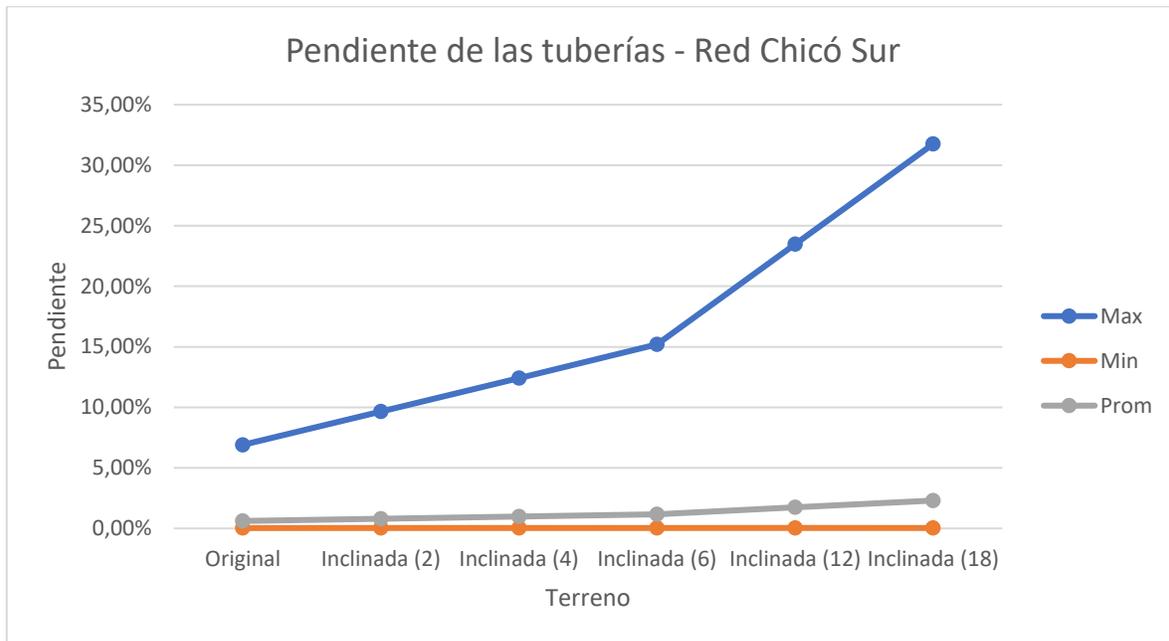
Gráfica 47. Costo total - Red Chicó Sur



Gráfica 48. Diferencia de nivel - Red Chicó Sur



Gráfica 49. Velocidad en las tuberías - Red Chicó Sur



Gráfica 50. Pendiente de las tuberías - Red Chicó Sur

Por último, se muestran los costos obtenidos a manera de tabla. Se indica el porcentaje que representan las cámaras de caída en el costo total:

Tabla 39. Costos - Red Chicó Sur

Red Chicó Sur				
Terreno	Costo T y E (USD\$)	Costo Cámaras (USD\$)	Costo total (USD\$)	Porcentaje cámaras
Original	\$ 3,289,888	-	\$ 3,289,888	-
Inclinado (2)	\$ 3,837,212	-	\$ 3,837,212	-
Inclinado (4)	\$ 4,412,987	-	\$ 4,412,987	-



Inclinado (6)	\$ 4,974,831	-	\$ 4,974,831	-
Inclinado (12)	\$ 6,649,020	-	\$ 6,649,020	-
Inclinada (18)	\$ 8,344,605		\$ 8,344,605	

4.2.8 Diámetros obtenidos – Red Chicó Sur

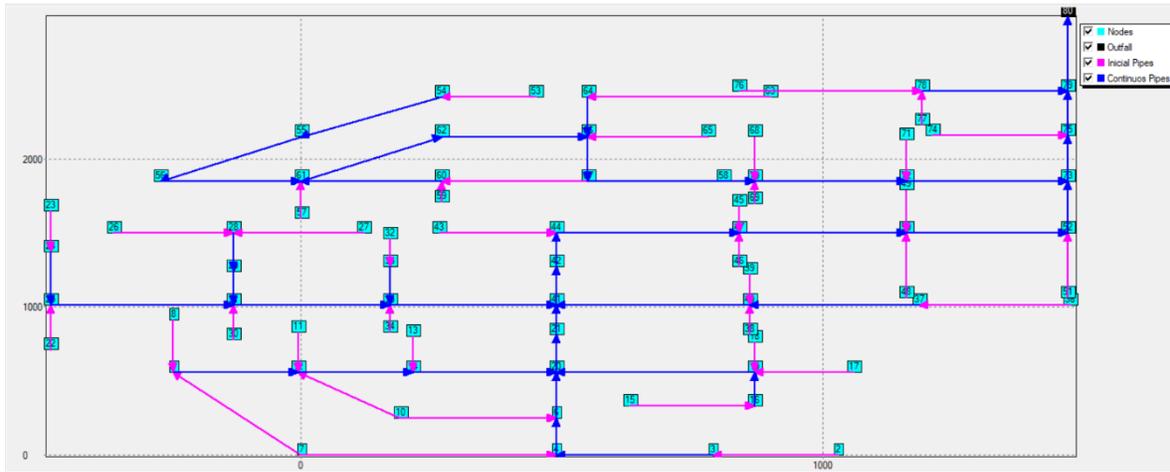
Se muestran los diámetros obtenidos en los diseños realizados:

Tabla 40. Diámetros obtenidos - Red Chicó Sur

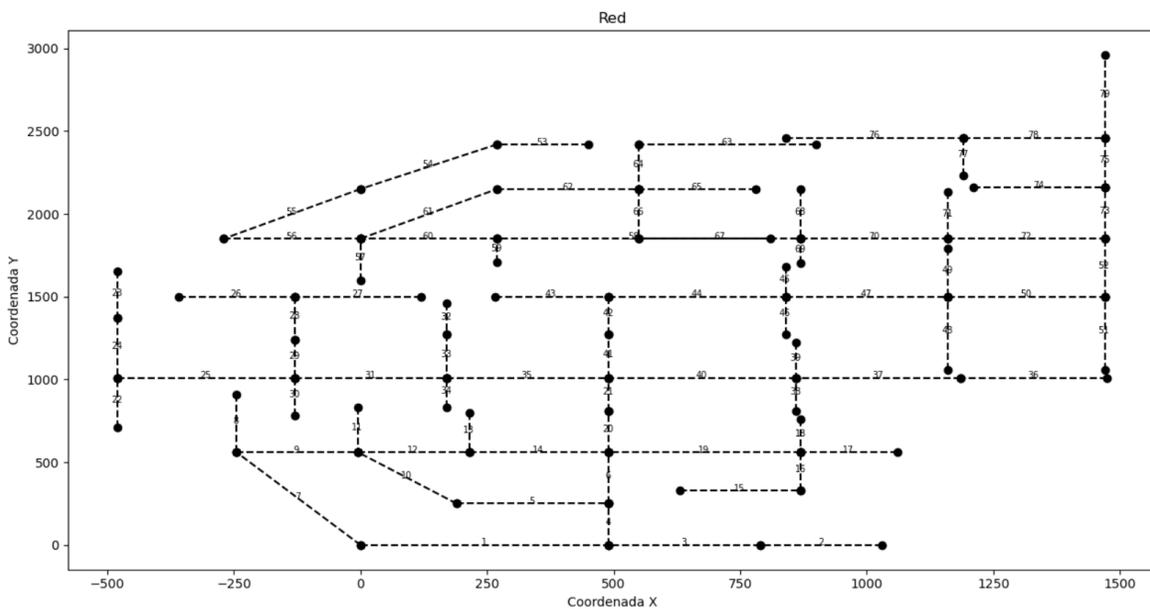
Red Chicó Sur			
Terreno	Diámetros Menores	Diámetros Medianos	Diámetros Grandes
Original	82	26	52
Inclinado (2)	84	25	51
Inclinado (4)	86	18	56
Inclinado (6)	88	17	55
Inclinado (12)	84	24	52
Inclinado (18)	86	19	55

4.3 Red Patrón de Li y Matthew

La red patrón de Li y Matthew consta de 80 pozos y 79 tuberías. El caudal de entrada promedio en los pozos es de $0.047 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo así un caudal de descarga de $3.72 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta red no presenta cámaras de caída.



Gráfica 51. Red Patrón Li y Matthew - Modelada en Xpress

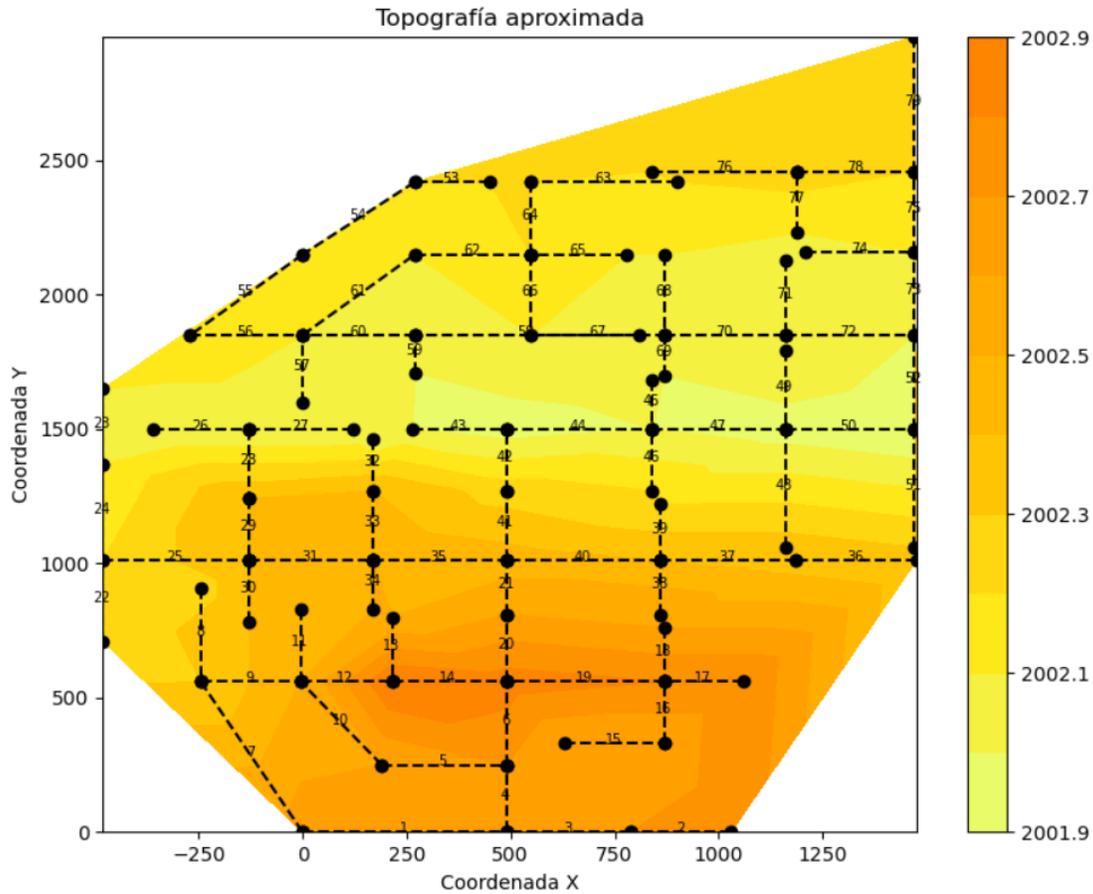


Gráfica 52. Red Patrón Li y Matthew

Debido a que en ningún terreno se generaron cámaras de caída, se optó por graficar el perfil que contenga la ruta más baja (RMB), es decir, la ruta más cercana al límite inferior. Dicha gráfica será realizada en cada uno de los diseños obtenidos.

4.3.1 Terreno original – Red Patrón de Li y Matthew

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 53. Terreno original - Red patrón Li y Matthew: Topografía

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno original de la red patrón Li y Matthew:

Tabla 41. Resultados: Terreno original - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew	
Original	
Longitud (m)	23061.62
Costo T y E (USD\$)	6823444.35
Diferencia de nivel (m)	
Max	4.2

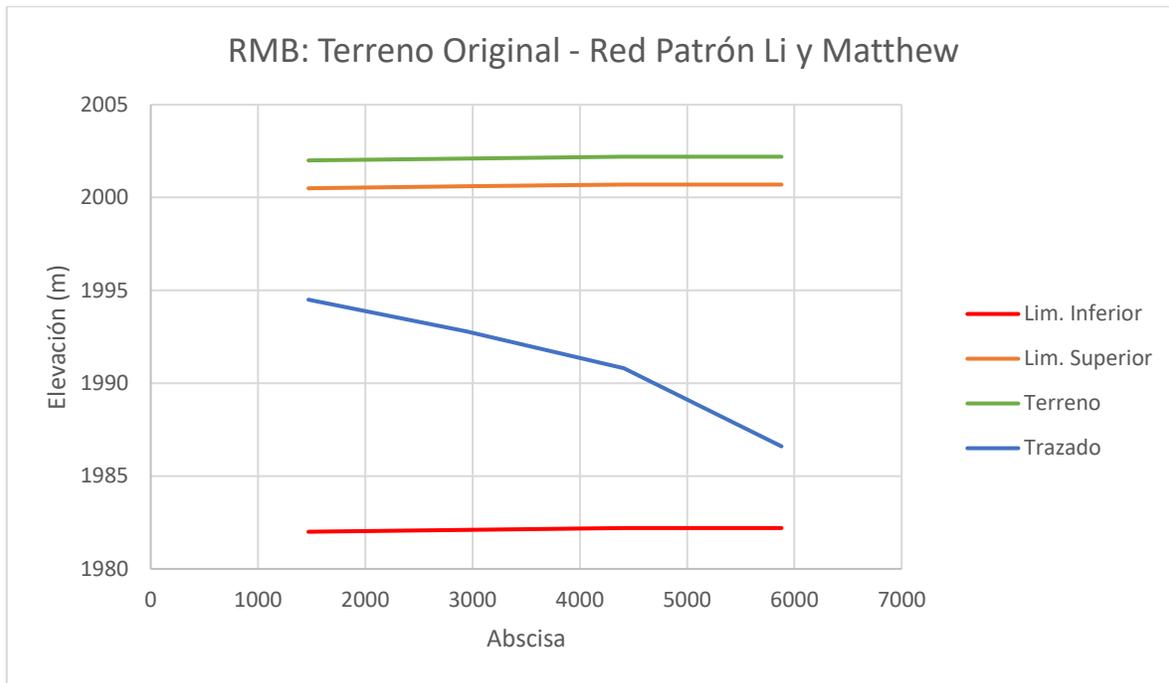


Min	0.15
Prom	0.65
Velocidad (m/s)	
Max	4.77
Min	0.64
Prom	0.99
Pendiente	
Max	0.0084
Min	0.000469
Prom	0.0022
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	6823444.35

Se muestra el perfil que contiene la ruta más baja (RMB) en este terreno:

Tabla 42. RMB: Terreno original - Red patrón Li y Matthew

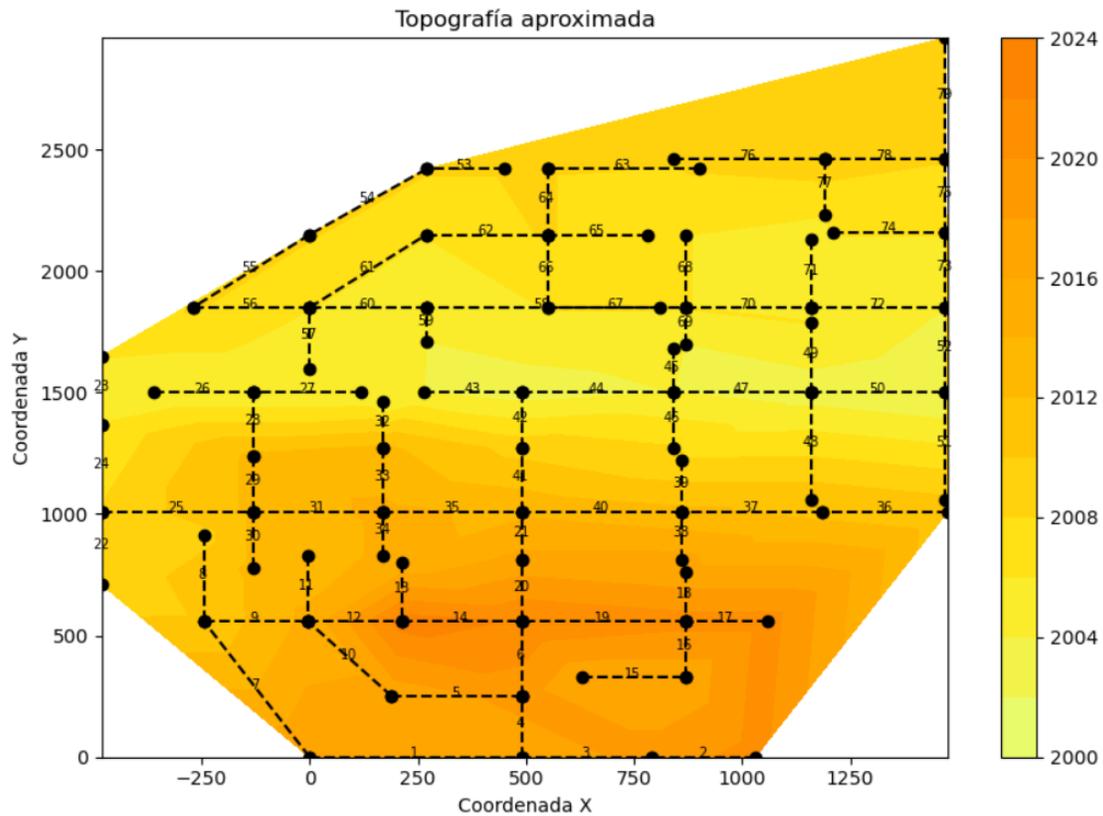
Terreno Original - Red Patrón Li y Matthew			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
73	75	1994.50	1992.80
75	79	1992.80	1990.80
79	80	1990.80	1986.60



Gráfica 54. RMB: Terreno original - Red patrón Li y Matthew

4.3.2 Terreno inclinado (100) – Red Patrón de Li y Matthew

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 55. Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew: Topografía

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (100) de la red patrón Li y Matthew:

Tabla 43. Resultados: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew	
Inclinado (100)	
Longitud (m)	23061.91
Costo T y E (USD\$)	11138929.69
Diferencia de nivel (m)	
Max	8.4
Min	0.15
Prom	1.07
Velocidad (m/s)	
Max	4.77
Min	0.64

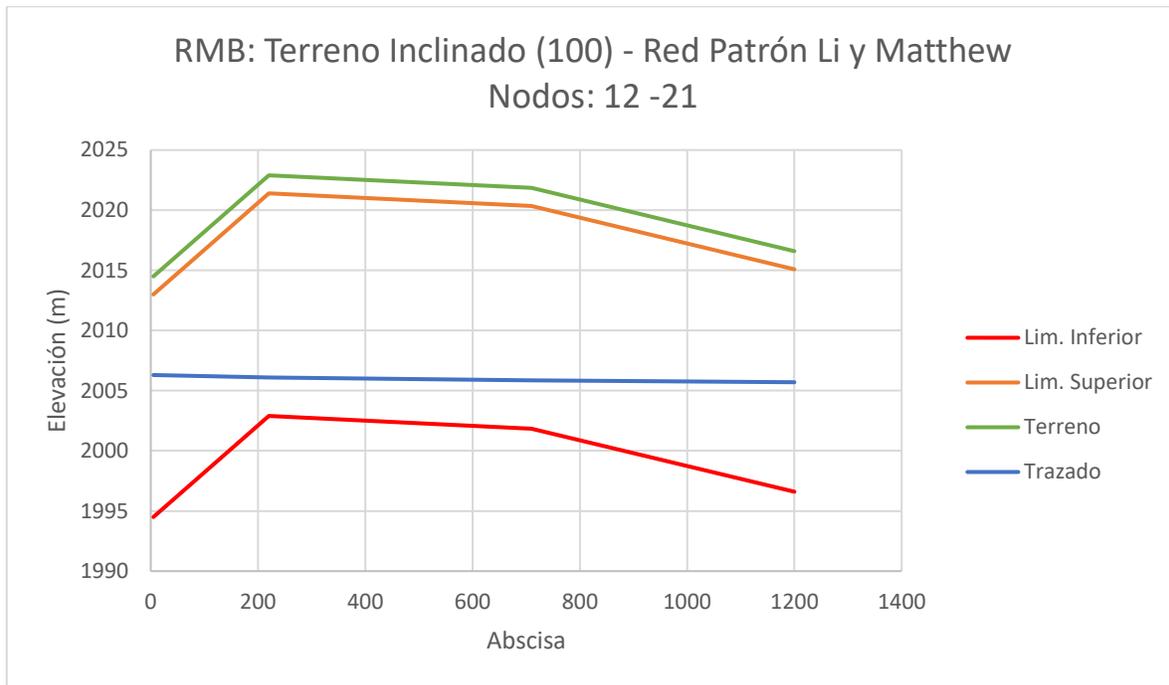


Prom	1.06
Pendiente	
Max	0.0210
Min	0.000469
Prom	0.0035
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	11138929.69

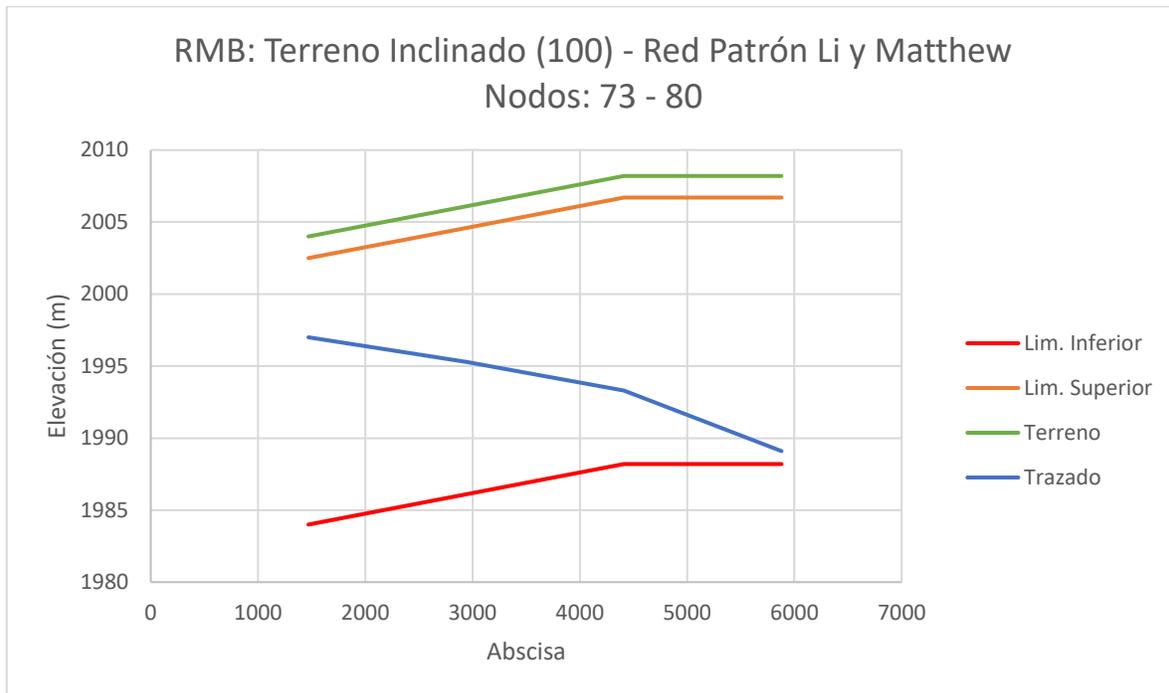
Se muestra el perfil que contiene la ruta más baja (RMB) en este terreno. Cabe mencionar que aquí se encontraron dos perfiles muy cercanos al límite inferior, por este motivo se decidió graficar ambos:

Tabla 44. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew

Terreno inclinado (100) - Red Patrón Li y Matthew			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
12	14	2006.30	2006.10
14	20	2006.10	2005.85
20	21	2005.85	2005.70
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
73	75	1997.00	1995.30
75	79	1995.30	1993.30
79	80	1993.30	1989.10



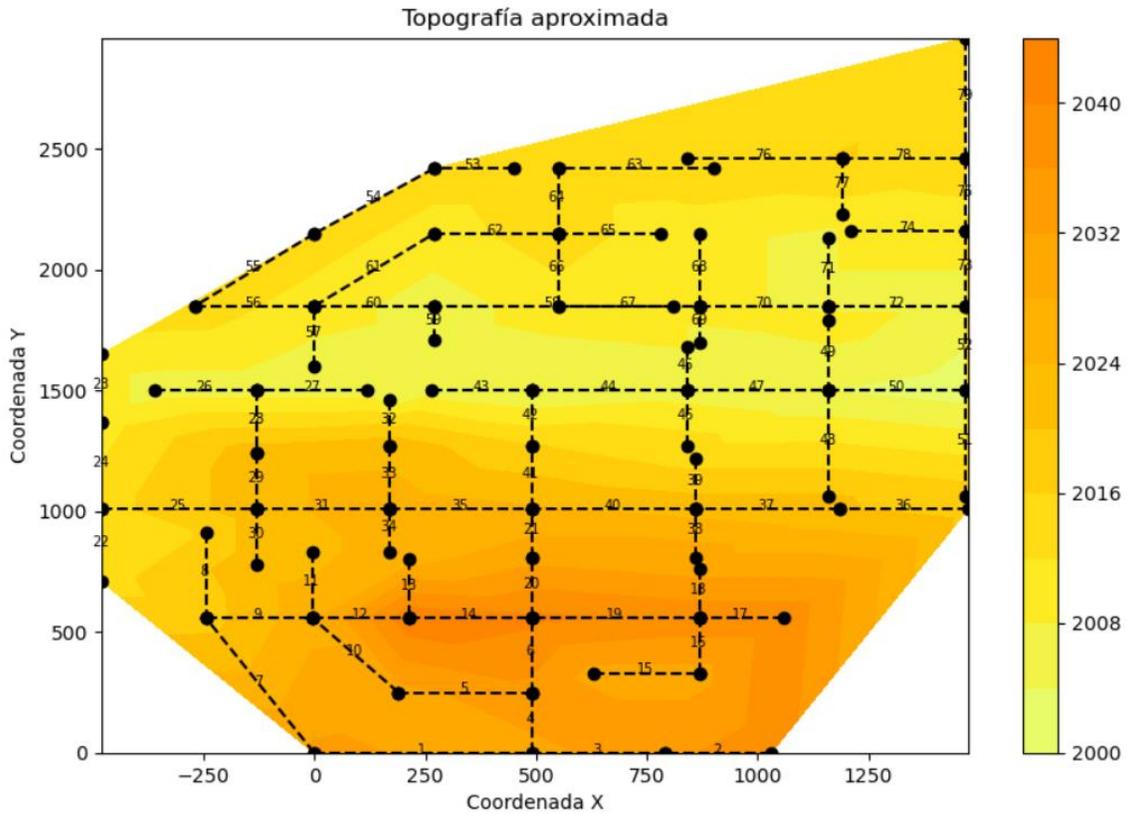
Gráfica 56. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew - Nodos: 12 – 21



Gráfica 57. RMB: Terreno inclinado (100) - Red patrón Li y Matthew - Nodos: 73 – 80

4.3.3 Terreno inclinado (200) – Red Patrón de Li y Matthew

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 58. Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew: Topografía

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (200) de la red patrón Li y Matthew:

Tabla 45. Resultados: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew	
Inclinado (200)	
Longitud (m)	23062.78
Costo T y E (USD\$)	16573234.68
Diferencia de nivel (m)	
Max	16.4
Min	0.15
Prom	1.64
Velocidad (m/s)	
Max	4.77
Min	0.65



Prom	1.13
Pendiente	
Max	0.0410
Min	0.000469
Prom	0.0052
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	16573234.68

Se muestra el perfil que contiene la ruta más baja (RMB) en este terreno:

Tabla 46. RMB: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew

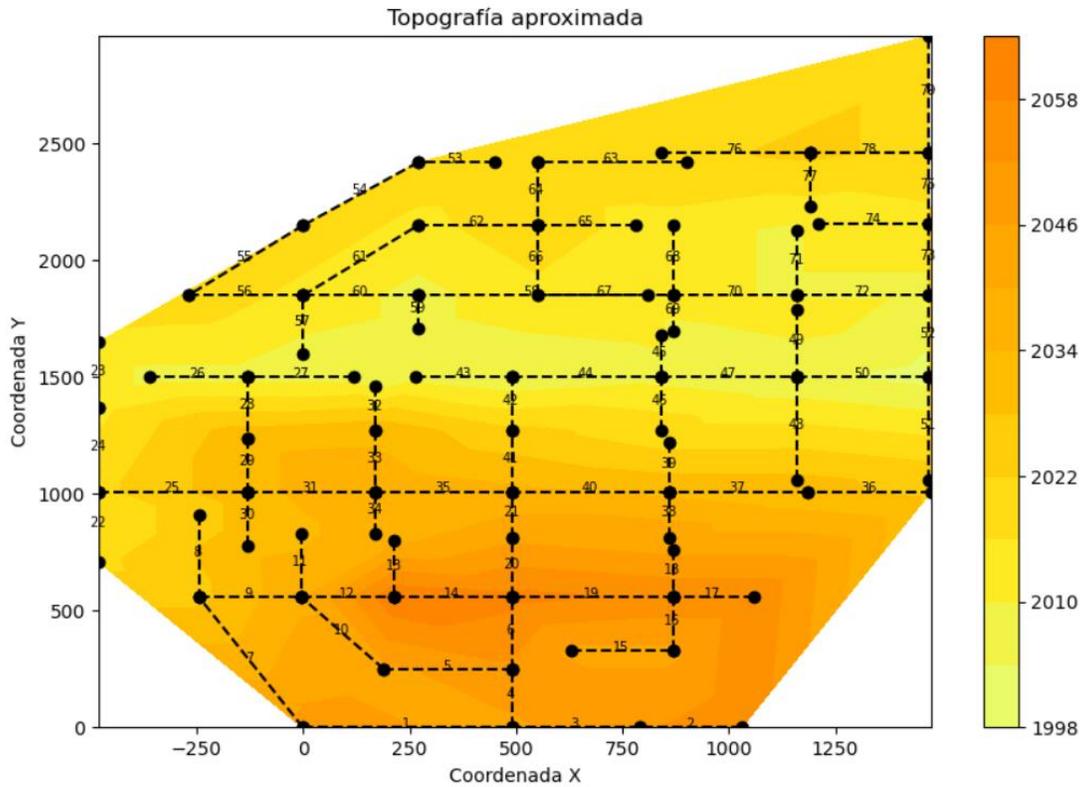
Terreno inclinado (200) - Red Patrón Li y Matthew			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
12	14	2013.30	2013.10
14	20	2013.10	2012.85
20	21	2012.85	2012.70



Gráfica 59. RMB: Terreno inclinado (200) - Red patrón Li y Matthew

4.3.4 Terreno inclinado (300) – Red Patrón de Li y Matthew

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 60. Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew: Topografía

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno inclinado (300) de la red patrón Li y Matthew:

Tabla 47. Resultados: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew	
Inclinado (300)	
Longitud (m)	23064.24
Costo T y E (USD\$)	22400592.44
Diferencia de nivel (m)	
Max	24.4
Min	0.15
Prom	2.22
Velocidad (m/s)	
Max	4.77
Min	0.65

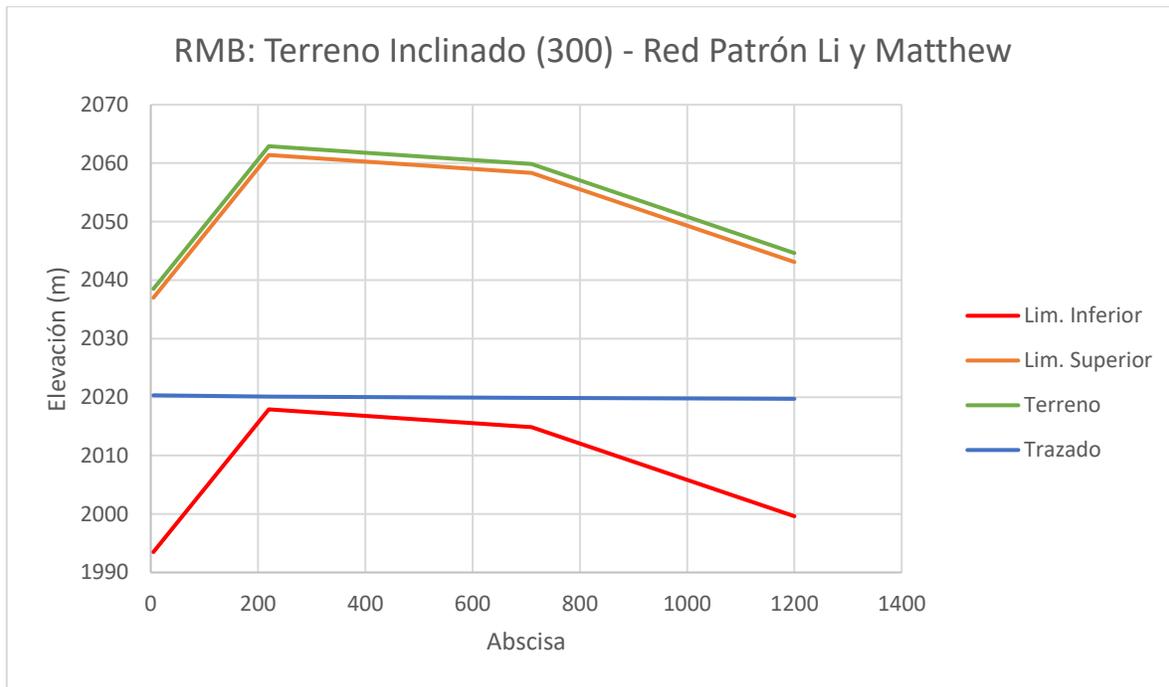


Prom	1.20
Pendiente	
Max	0.0610
Min	0.000469
Prom	0.0070
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	22400592.44

Se muestra el perfil que contiene la ruta más baja (RMB) en este terreno:

Tabla 48. RMB: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew

Terreno inclinado (300) - Red Patrón Li y Matthew			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
12	14	2020.30	2020.10
14	20	2020.10	2019.85
20	21	2019.85	2019.70



Gráfica 61. RMB: Terreno inclinado (300) - Red patrón Li y Matthew

4.3.5 Resultados globales – Red Patrón de Li y Matthew

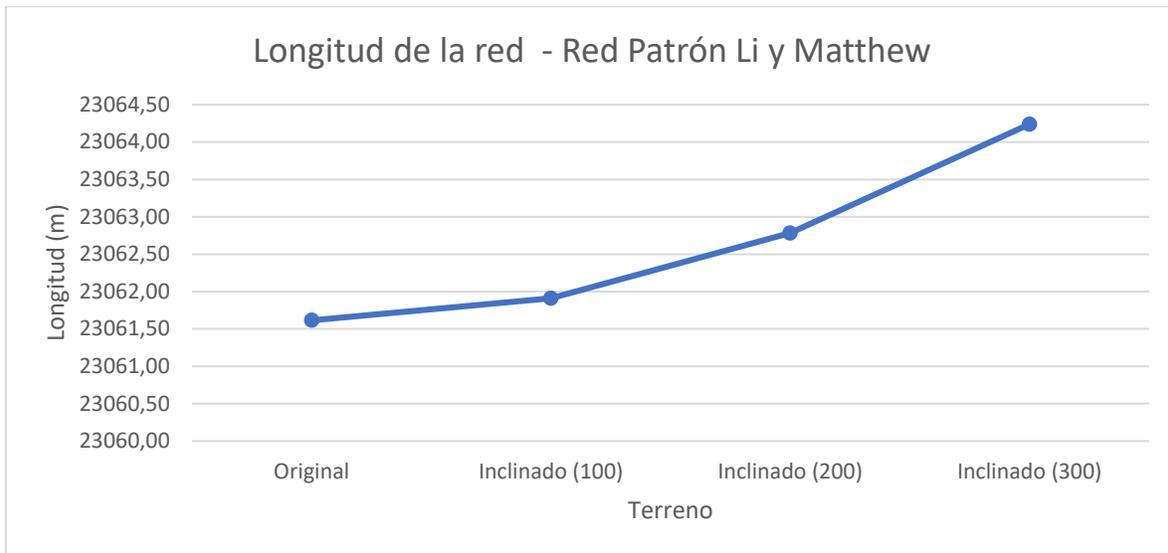
A continuación, se muestran los resultados globales:

Primero, se muestra la profundidad máxima utilizada en cada diseño:

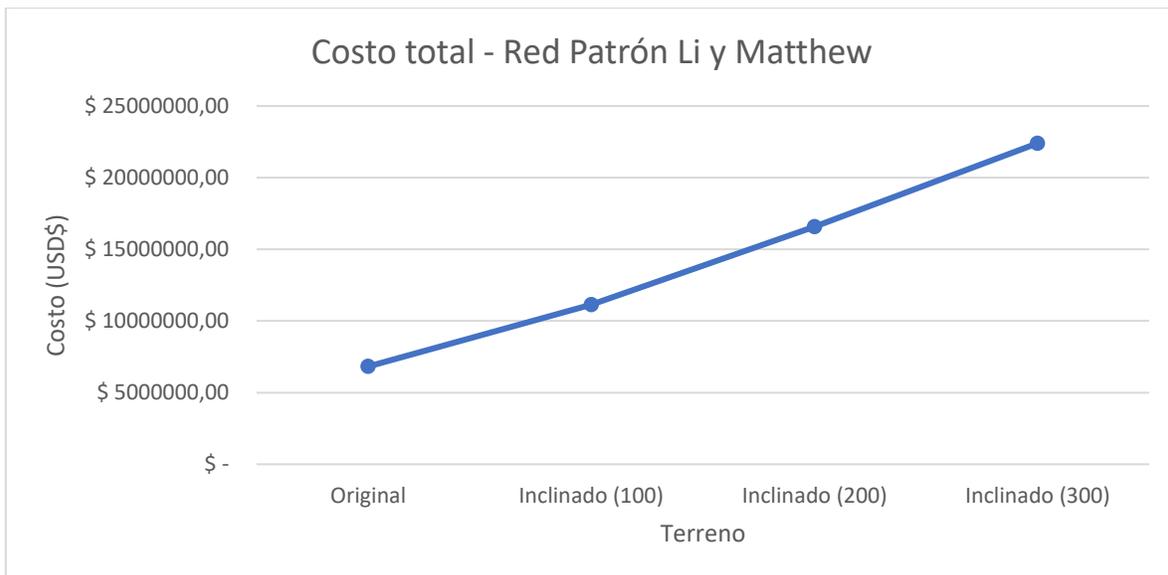
Tabla 49. Profundidad máxima - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew	
Terreno	Profundidad máxima (m)
Original	20
Inclinado (100)	20
Inclinado (200)	30
Inclinado (300)	45

Seguidamente, se muestran los demás resultados:



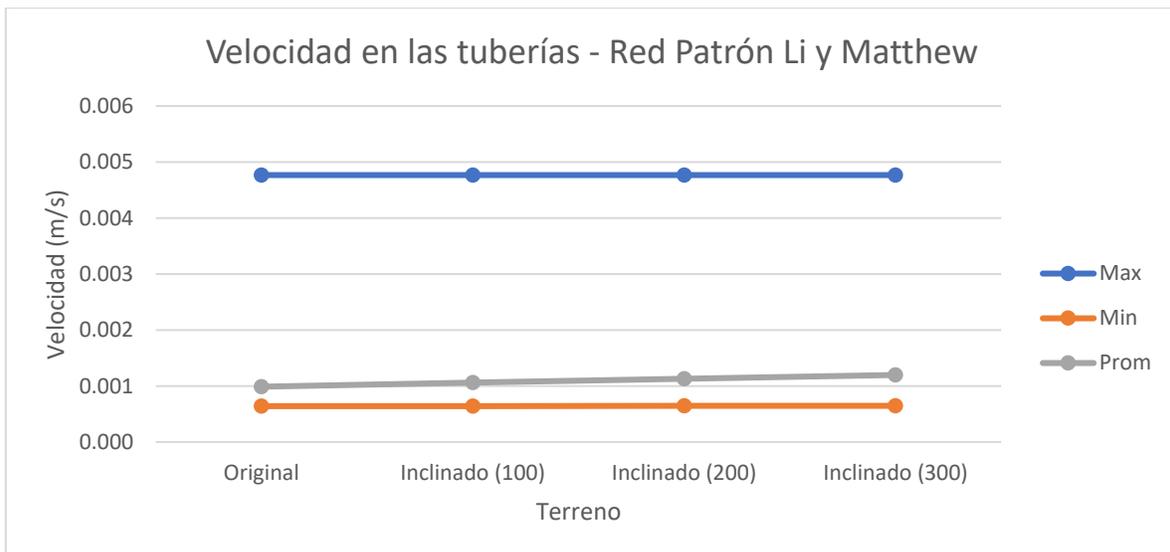
Gráfica 62. Longitud de la red - Red patrón Li y Matthew



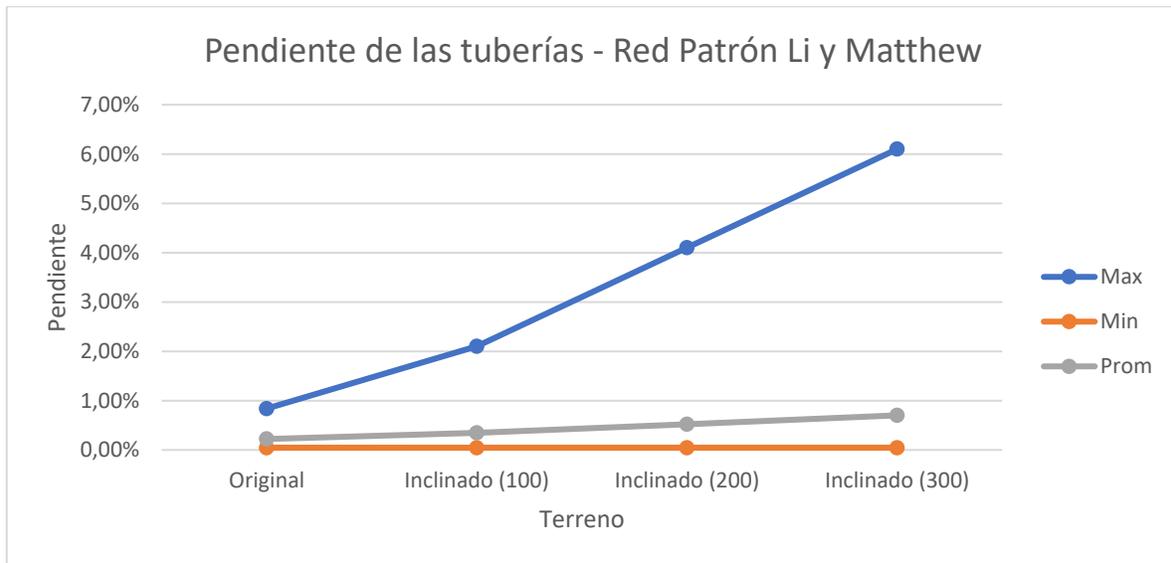
Gráfica 63. Costo total - Red patrón Li y Matthew



Gráfica 64. Diferencia de nivel - Red patrón Li y Matthew



Gráfica 65. Velocidad en las tuberías - Red patrón Li y Matthew



Gráfica 66. Pendiente de las tuberías - Red patrón Li y Matthew

Por último, se muestran los costos obtenidos a manera de tabla. Se indica el porcentaje que representan las cámaras de caída en el costo total:

Tabla 50. Costos - Red patrón Li y Matthew

Red Patrón Li y Matthew				
Terreno	Costo T y E (USD\$)	Costo Cámaras (USD\$)	Costo total (USD\$)	Porcentaje cámaras
Original	\$ 6,823,444	-	\$ 6,823,444	-
Inclinado (100)	\$ 11,138,930	-	\$ 11,138,930	-
Inclinado (200)	\$ 16,573,235	-	\$ 16,573,235	-
Inclinado (300)	\$ 22,400,592	-	\$ 22,400,592	-

4.3.6 Diámetros obtenidos – Red Patrón de Li y Matthew

Se muestran los diámetros obtenidos en los diseños realizados:

Tabla 51. Diámetros obtenidos - Red Patrón Li y Matthew

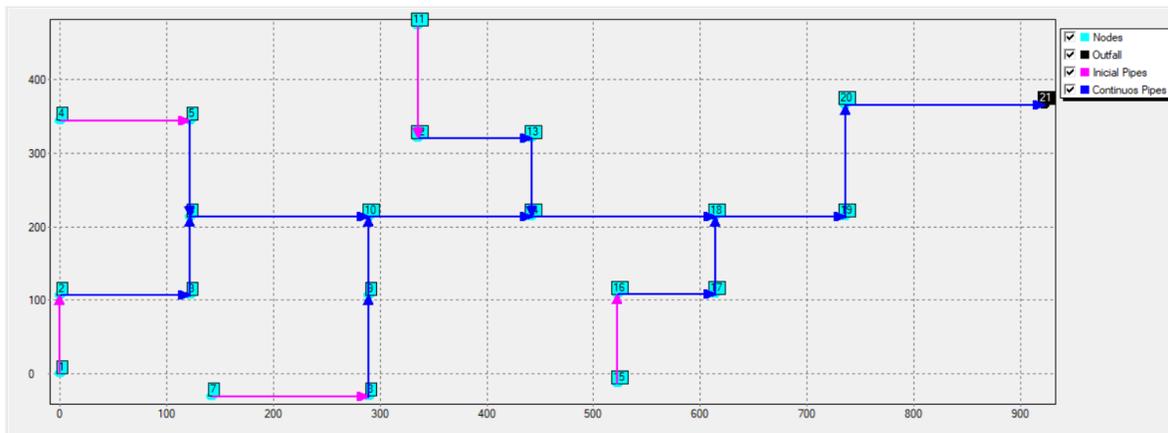
Red patrón Li y Matthew



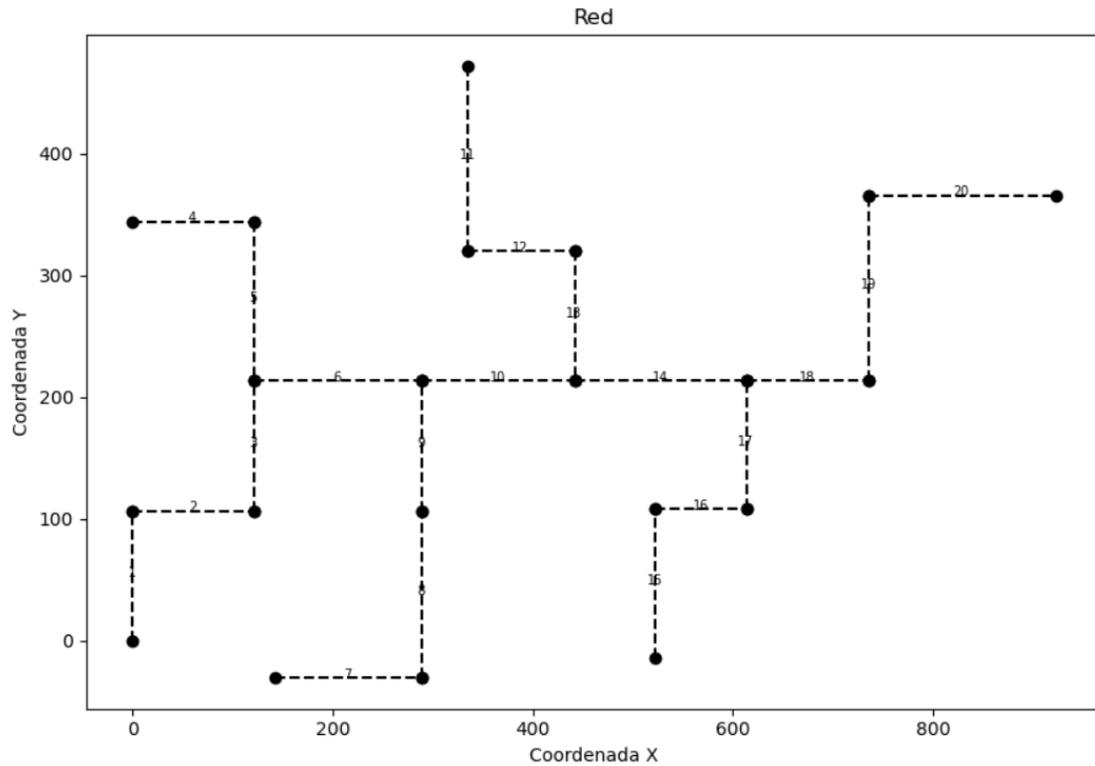
Terreno	Diámetros Menores	Diámetros Medianos	Diámetros Grandes
Original	48	5	26
Inclinado (100)	47	9	23
Inclinado (200)	44	5	30
Inclinado (300)	44	6	29

4.4 Red Patrón de Mays y Wenzel

La red patrón de Mays y Wenzel consta de 21 pozos y 20 tuberías. El caudal de entrada promedio en los pozos es de $0.133 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo así un caudal de descarga de $2.66 \text{ m}^3/\text{s}$. Debido a que la red original no posee una gran inclinación se modificó la altura de distintos pozos para obtener pendientes del terreno mayores. Dichas modificaciones fueron realizadas manualmente y no con la metodología expuesta por Noriega(2020). Esta red sí presenta cámaras de caída.



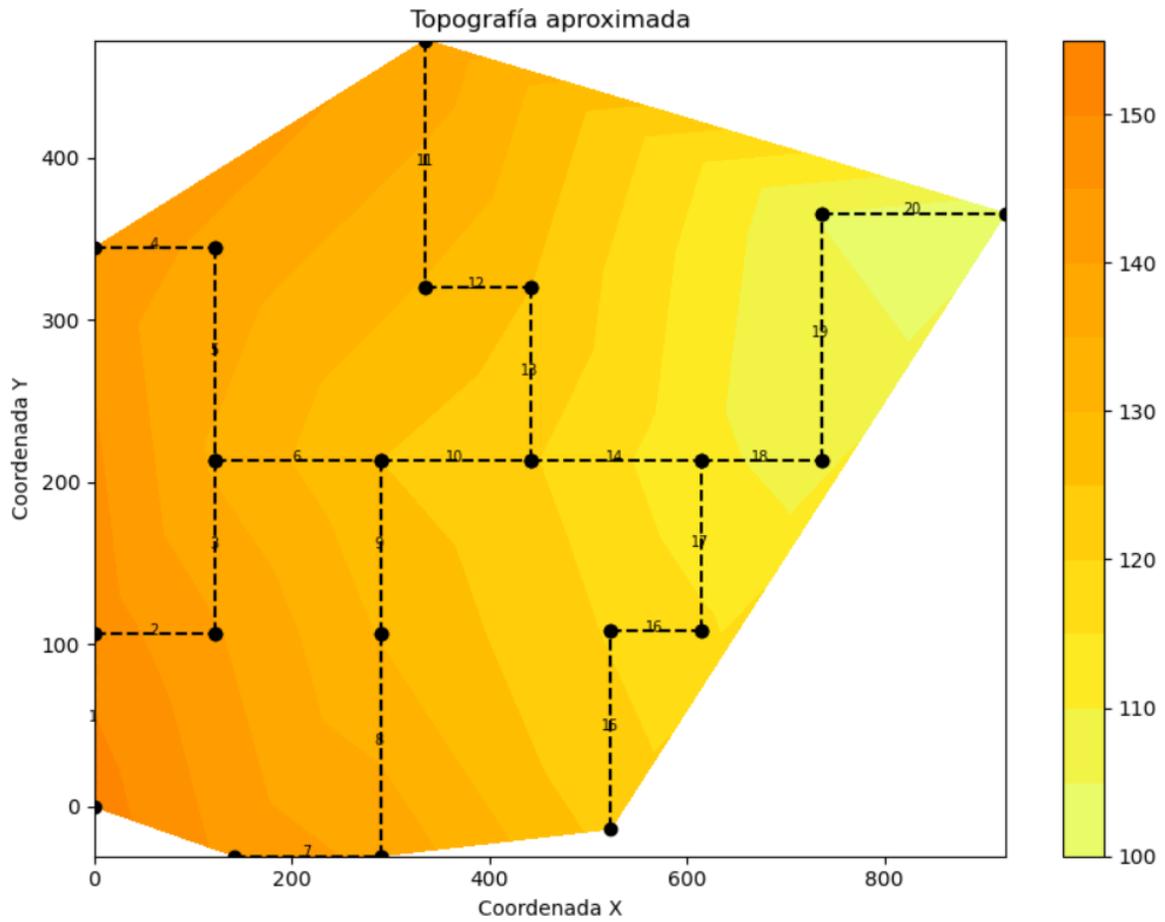
Gráfica 67. Red patrón de Mays y Wenzel - Modelada en Xpress



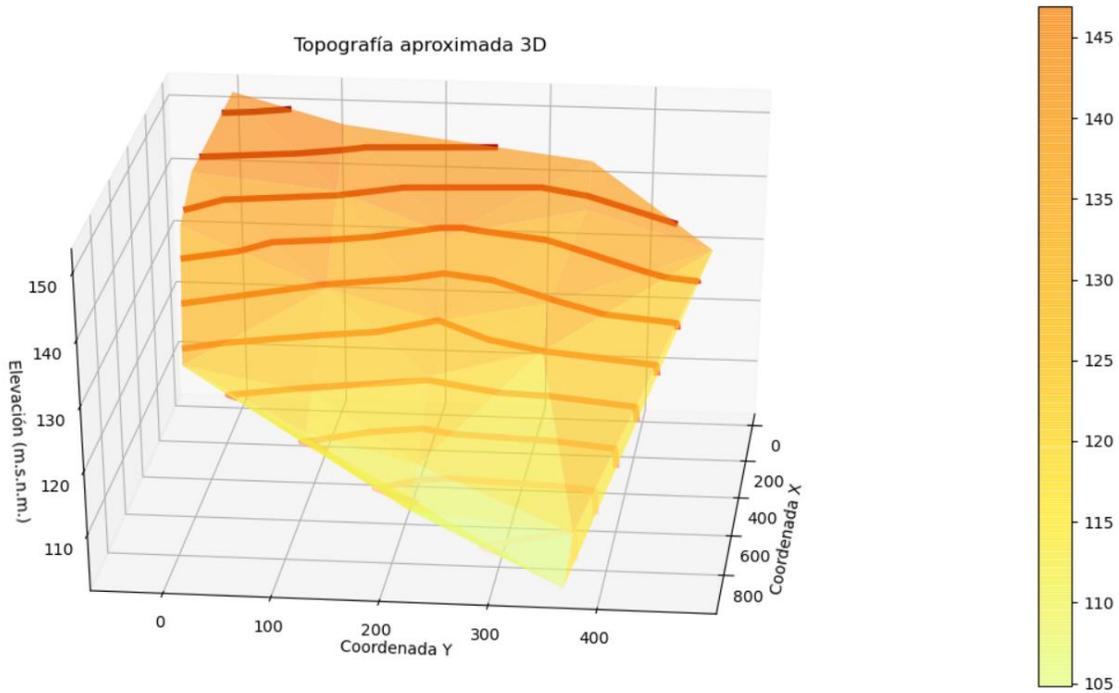
Gráfica 68. Red patrón de Mays y Wenzel

4.4.1 Terreno x3 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 69. Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 70. Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x3 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 52. Resultados: Terreno x3 - Red patrón Mays y Wenzel

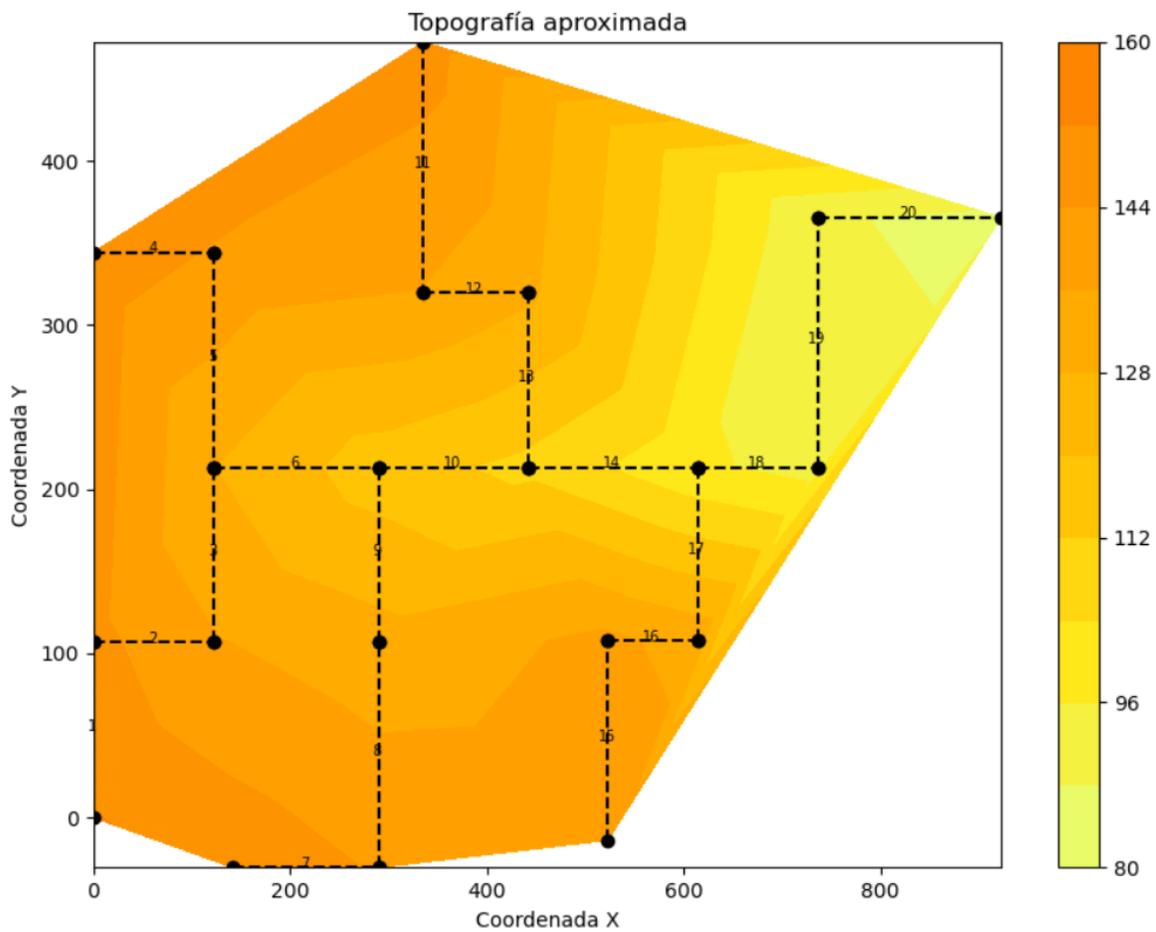
Red patrón Mays y Wenzel	
X3	
Longitud (m)	2619.83
Costo T y E (USD\$)	303899.83
Diferencia de nivel (m)	
Max	9.544
Min	2.7432
Prom	5.47
Velocidad (m/s)	
Max	8.61
Min	3.24
Prom	5.26
Pendiente	
Max	0.0674



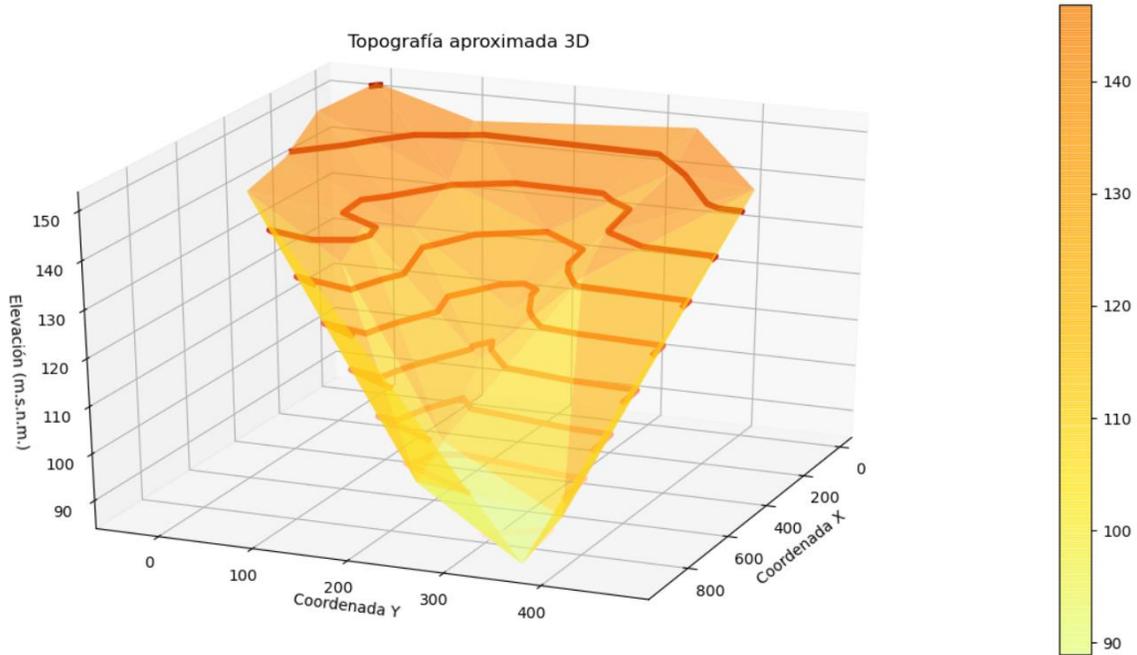
Min	0.015242
Prom	0.0423
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	303899.83

4.4.2 Terreno x4 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 71. Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 72. Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x4 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 53. Resultados: Terreno x4 - Red patrón Mays y Wenzel

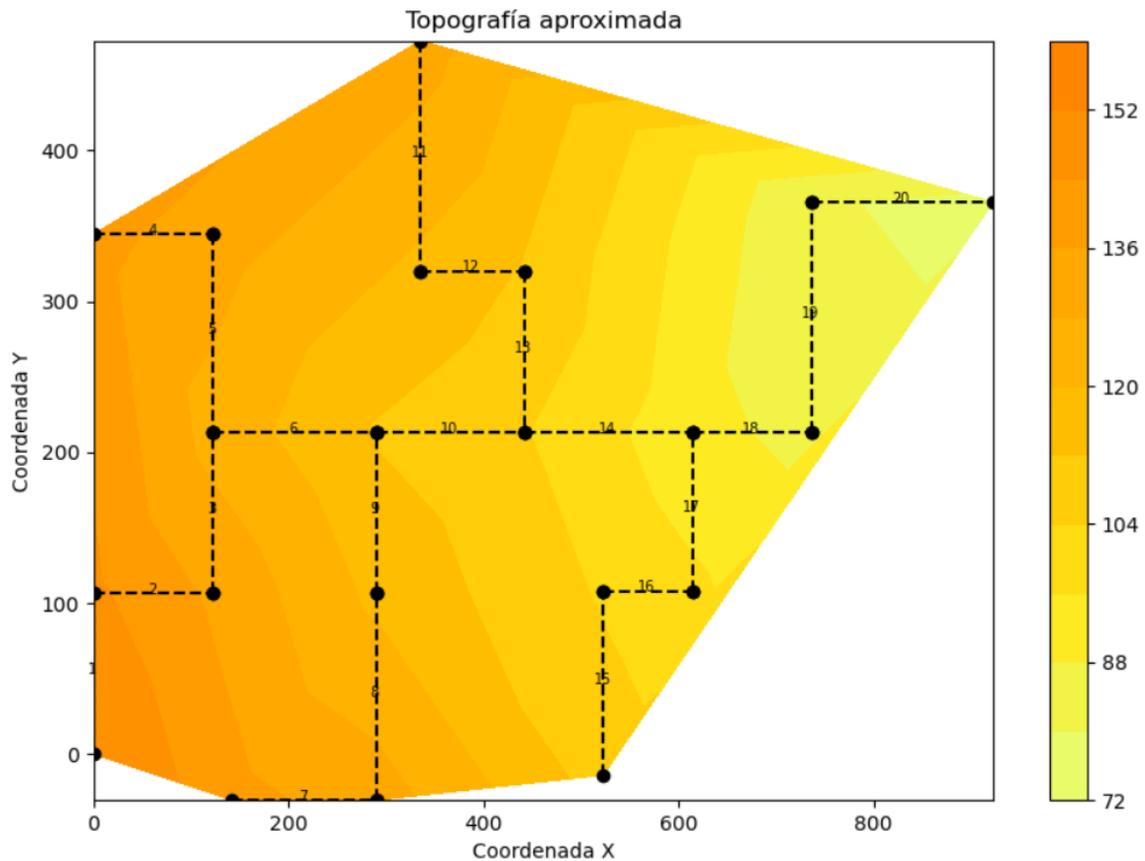
Red patrón Mays y Wenzel	
X4	
Longitud (m)	2630.72
Costo T y E (USD\$)	303899.83
Diferencia de nivel (m)	
Max	35.3568
Min	3.6576
Prom	10.33
Velocidad (m/s)	
Max	9.70
Min	3.69
Prom	6.43
Pendiente	
Max	0.3360
Min	0.020144



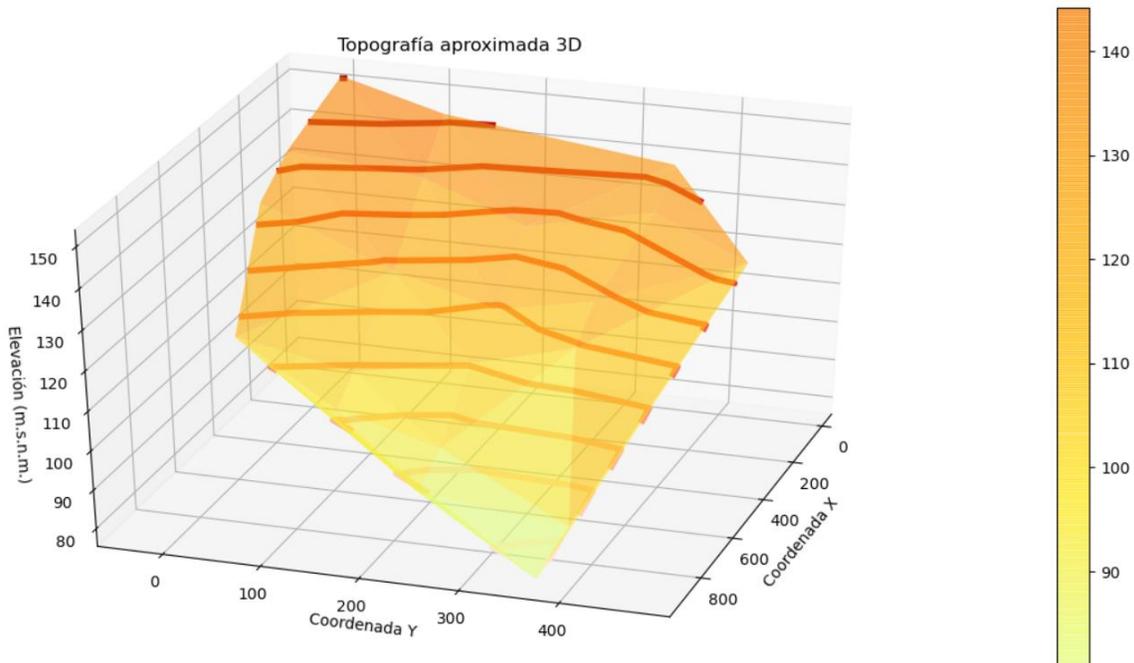
Prom	0.0844
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	303899.83

4.4.3 Terreno x4.5 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 73. Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 74. Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x4.5 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 54. Resultados: Terreno x4.5 - Red patrón Mays y Wenzel

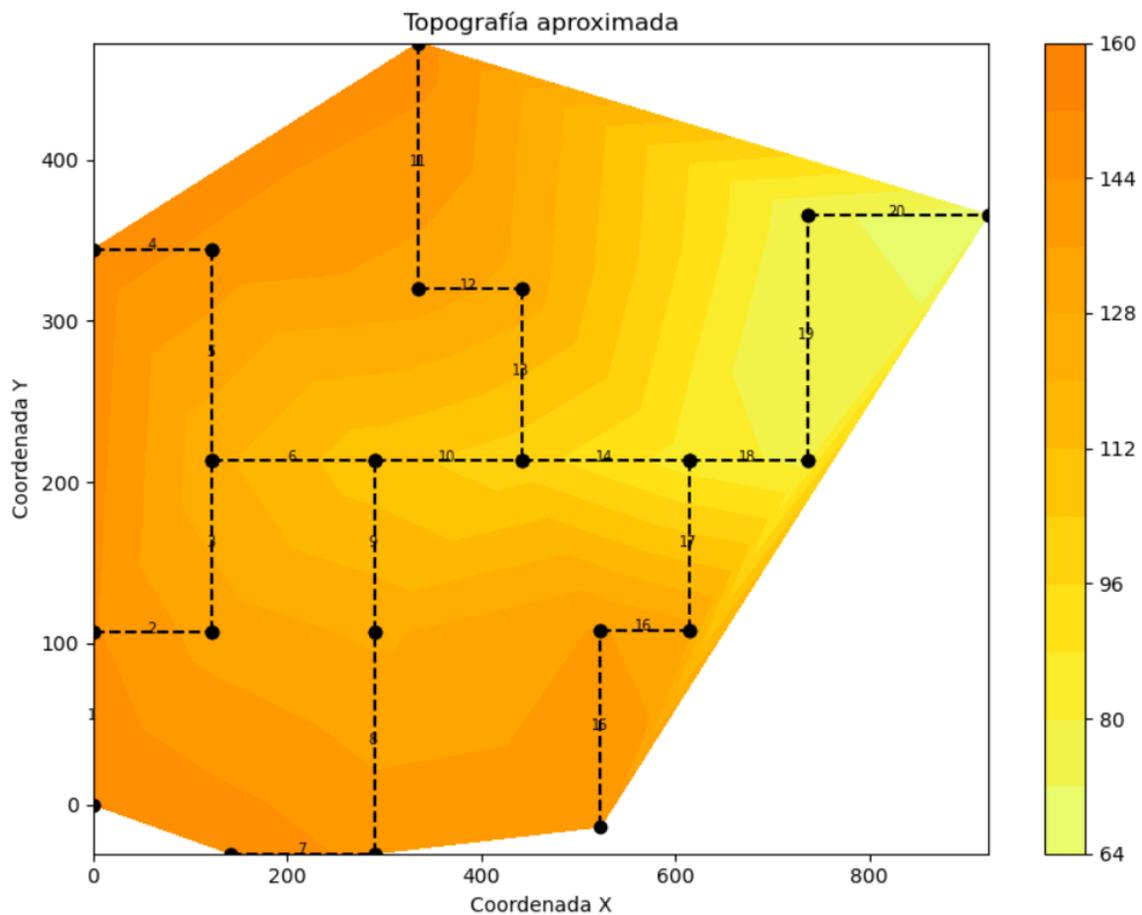
Red patrón Mays y Wenzel	
X4.5	
Longitud (m)	2622.99
Costo T y E (USD\$)	303899.83
Diferencia de nivel (m)	
Max	14.116
Min	4.1148
Prom	8.17
Velocidad (m/s)	
Max	9.91
Min	3.87
Prom	6.09
Pendiente	
Max	0.1007



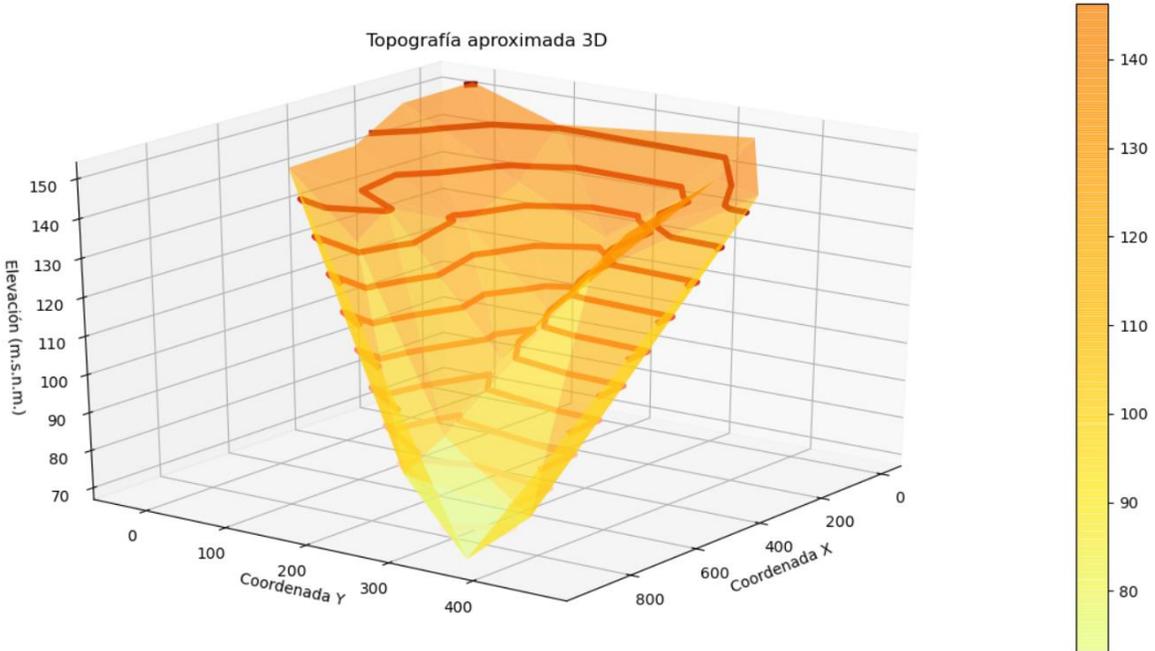
Min	0.022595
Prom	0.0632
Cámaras	
Número	0
Pozo	Altura (m)
-	-
Costo Cámaras (USD\$)	0
Costo total (USD\$)	303899.83

4.4.4 Terreno x5 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 75. Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 76. Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x5 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 55. Resultados: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel	
X5	
Longitud (m)	2639.72
Costo T y E (USD\$)	311335.81
Diferencia de nivel (m)	
Max	47.0344
Min	4.572
Prom	13.16
Velocidad (m/s)	
Max	9.96
Min	4.04
Prom	6.89
Pendiente	

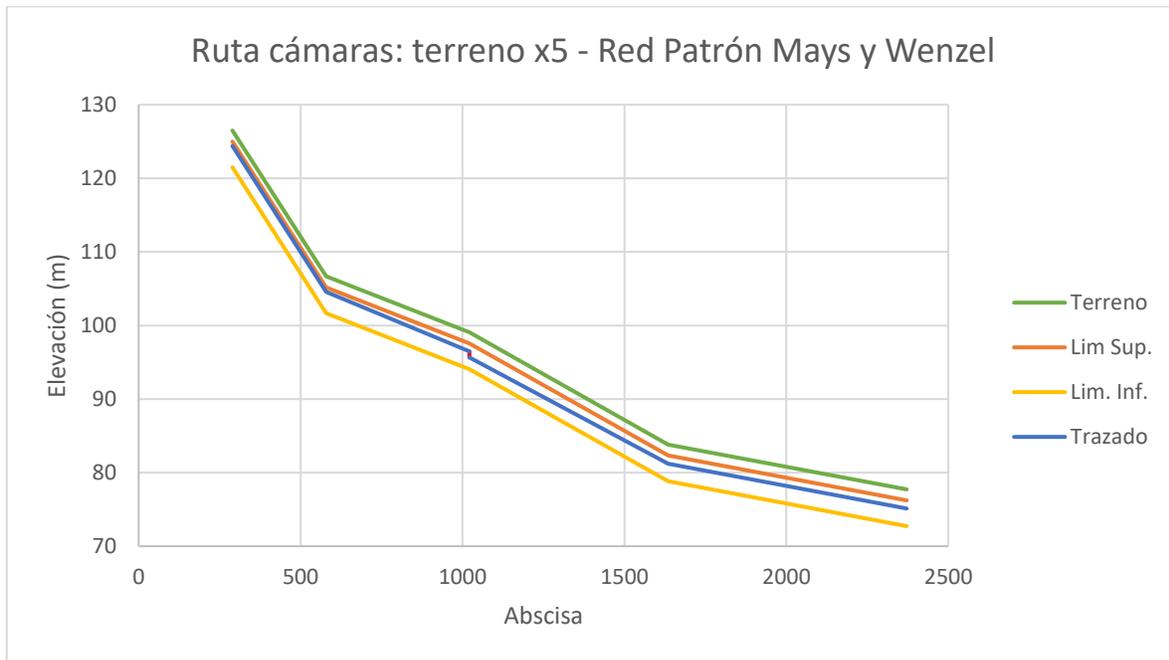


Max	0.4470
Min	0.02451
Prom	0.1078
Cámaras	
Número	1
Pozo	Altura (m)
14	0.8
Costo Cámaras (USD\$)	1436.63207
Costo total (USD\$)	312772.44

Debido a que en este terreno se presentaron cámaras de caída se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 56. Ruta Cámaras: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel

Terreno X5 - Red Patrón Mays y Wenzel			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
9	10	124.39	104.58
10	14	104.58	96.46
14	18	95.66	81.22
18	19	81.22	75.12



Gráfica 77. Ruta Cámaras: Terreno x5 - Red patrón Mays y Wenzel

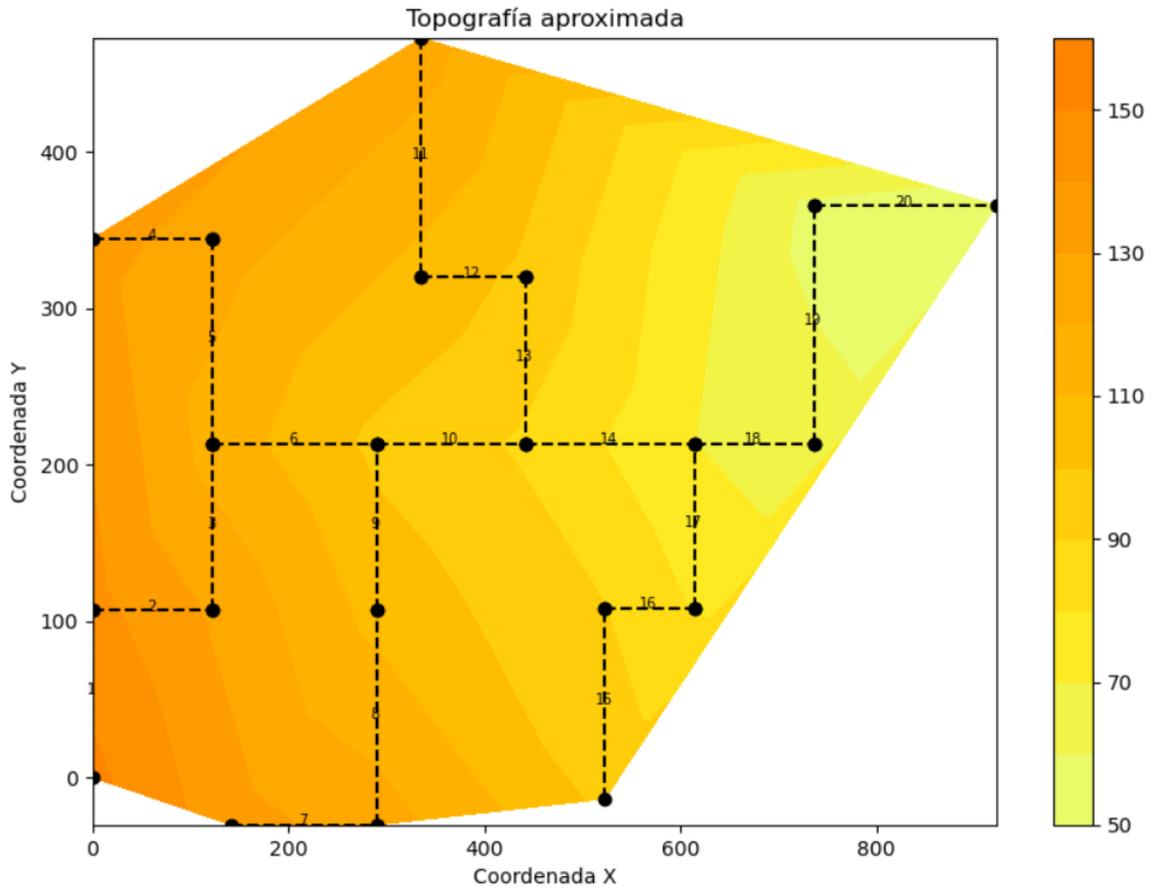
A diferencia de la red Miraflores el pozo en el cual se presenta la cámara de caída tiene más de una conexión, por lo que a continuación se muestran todas las tuberías que entran o salen del pozo que presenta la cámara (pozo 14):

Tabla 57. Conexiones a la cámara de caída - Terreno X5 - Red patrón Mays y Wenzel

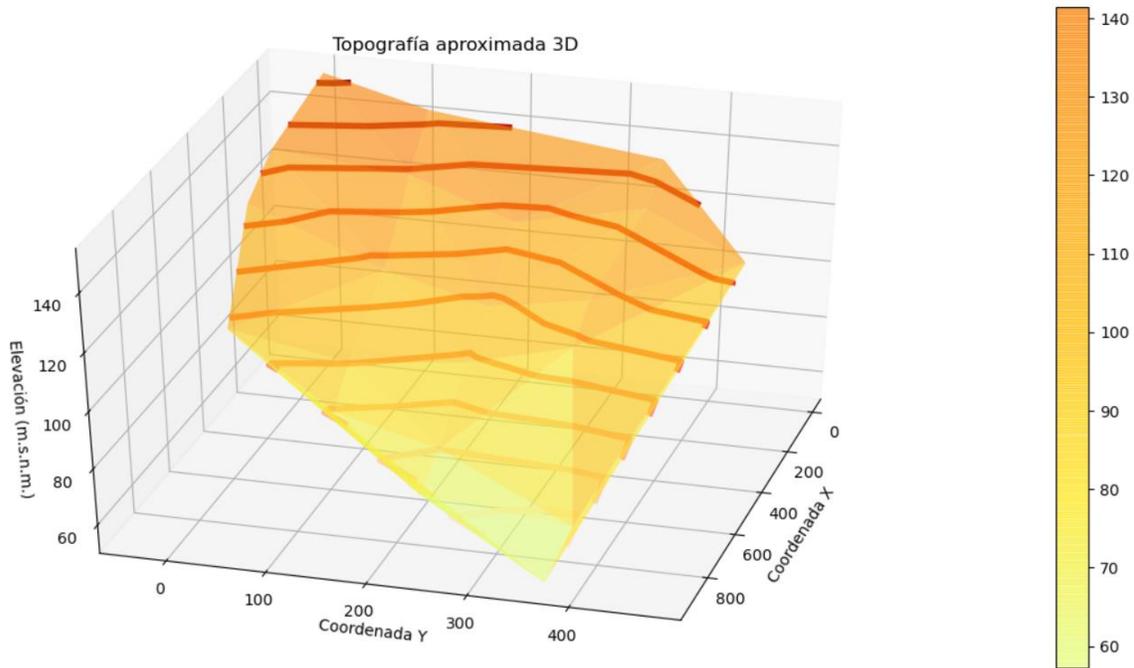
Terreno X5	Red patrón Mays y Wenzel			
	Tubería		Elevación (m)	
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
	14	18	95.66	81.22
	13	14	122.47	96.46
	10	14	104.58	96.46

4.4.5 Terreno x6 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 78. Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 79. Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x6 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 58. Resultados: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel	
X6	
Longitud (m)	2627.45
Costo T y E (USD\$)	343824.05
Diferencia de nivel (m)	
Max	18.388
Min	5.4864
Prom	10.89
Velocidad (m/s)	
Max	9.99
Min	4.34
Prom	6.72
Pendiente	
Max	0.1341
Min	0.029412

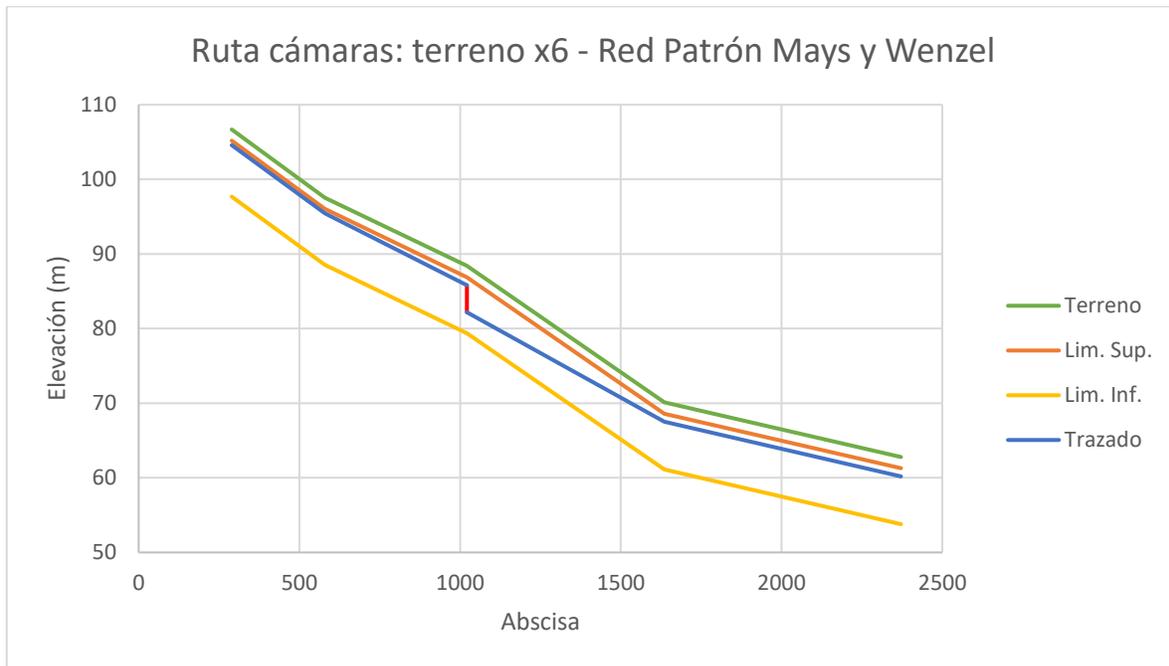


Prom	0.0853
Cámaras	
Número	1
Pozo	Altura (m)
14	3.6
Costo Cámaras (USD\$)	3156.03121
Costo total (USD\$)	346980.08

Debido a que en este terreno se presentaron cámaras de caída se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 59. Ruta Cámaras: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel

Terreno X6 - Red Patrón Mays y Wenzel			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
9	10	104.58	95.44
10	14	95.44	85.79
14	18	82.19	67.50
18	19	67.50	60.19



Gráfica 80. Ruta Cámaras: Terreno x6 - Red patrón Mays y Wenzel

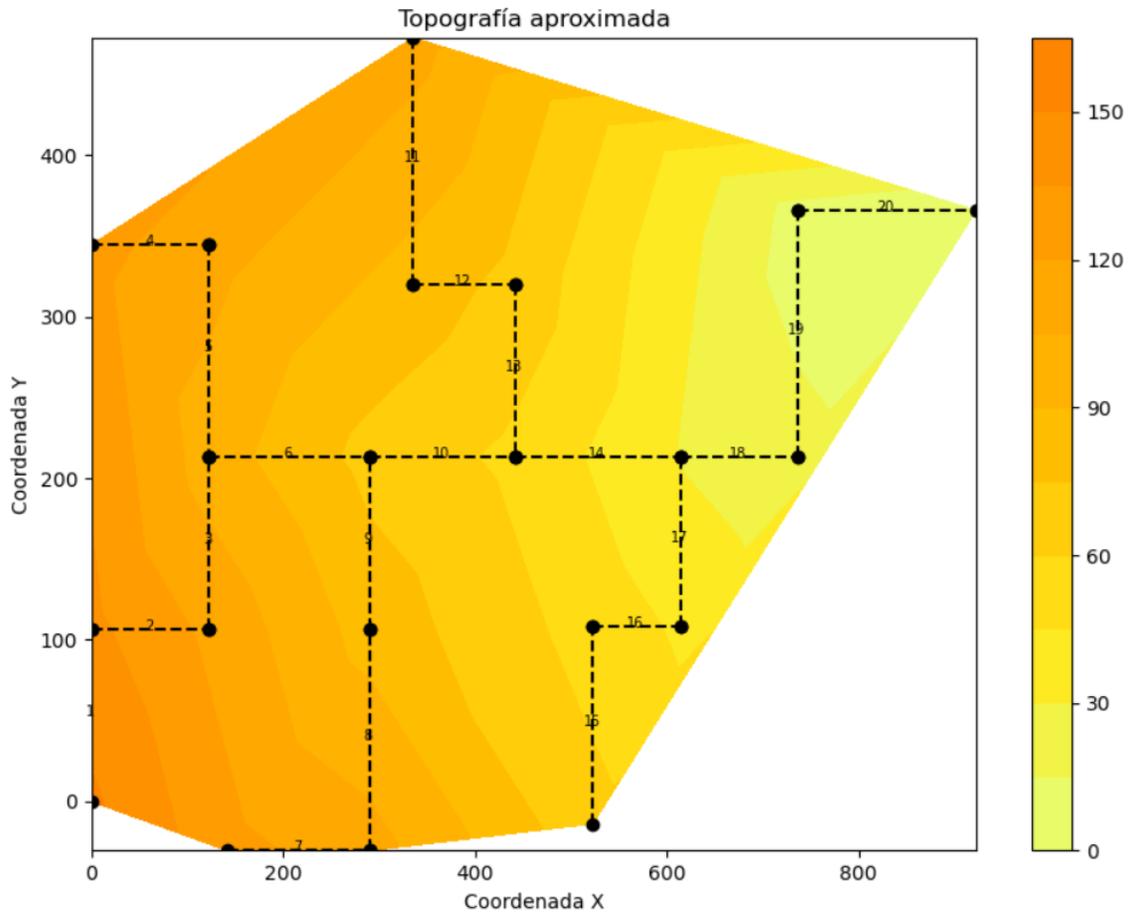
A diferencia de la red Miraflores el pozo en el cual se presenta la cámara de caída tiene más de una conexión, por lo que a continuación se muestran todas las tuberías que entran o salen del pozo que presenta la cámara (pozo 14):

Tabla 60. Conexiones a la cámara de caída - Terreno X6 - Red patrón Mays y Wenzel

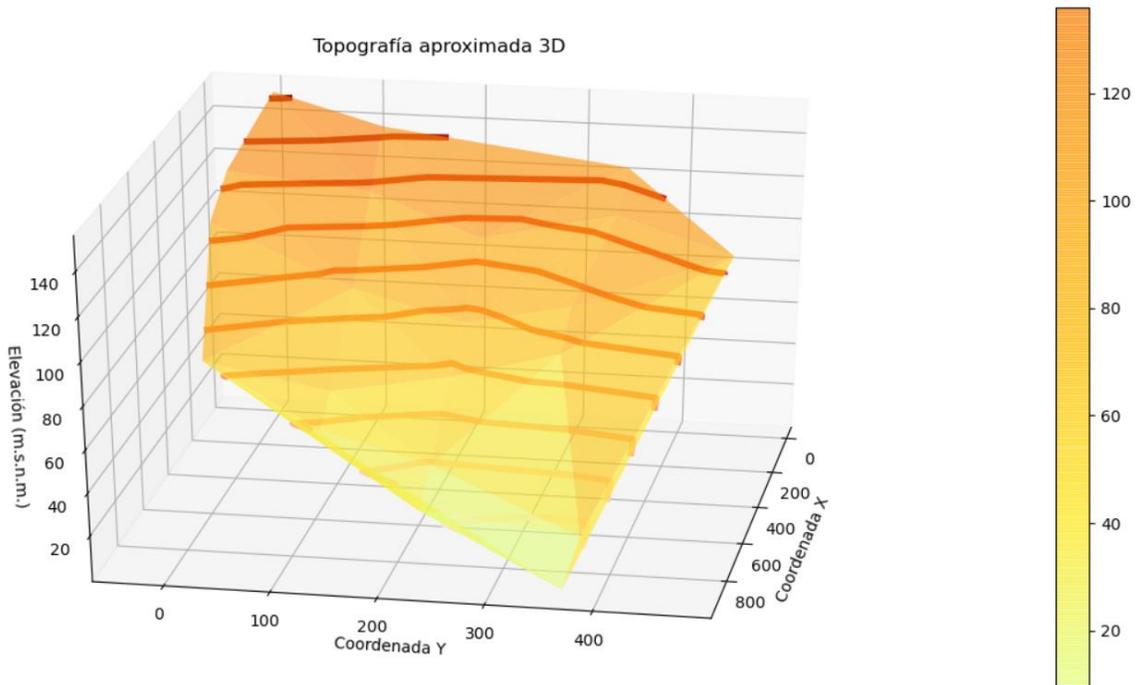
Terreno X6	Red patrón Mays y Wenzel			
	Tubería		Elevación (m)	
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
	14	18	82.19	67.50
	13	14	95.44	85.79
	10	14	95.44	85.79

4.4.6 Terreno x9 – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se presenta la topografía del terreno:



Gráfica 81. Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía



Gráfica 82. Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel: Topografía 3D

Se presentan los resultados obtenidos para el terreno x9 de la red patrón de Mays y Wenzel:

Tabla 61. Resultados: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel	
X9	
Longitud (m)	2638.22
Costo T y E (USD\$)	453488.34
Diferencia de nivel (m)	
Max	27.532
Min	8.3296
Prom	15.56
Velocidad (m/s)	
Max	9.98
Min	4.84
Prom	7.64
Pendiente	
Max	0.2007

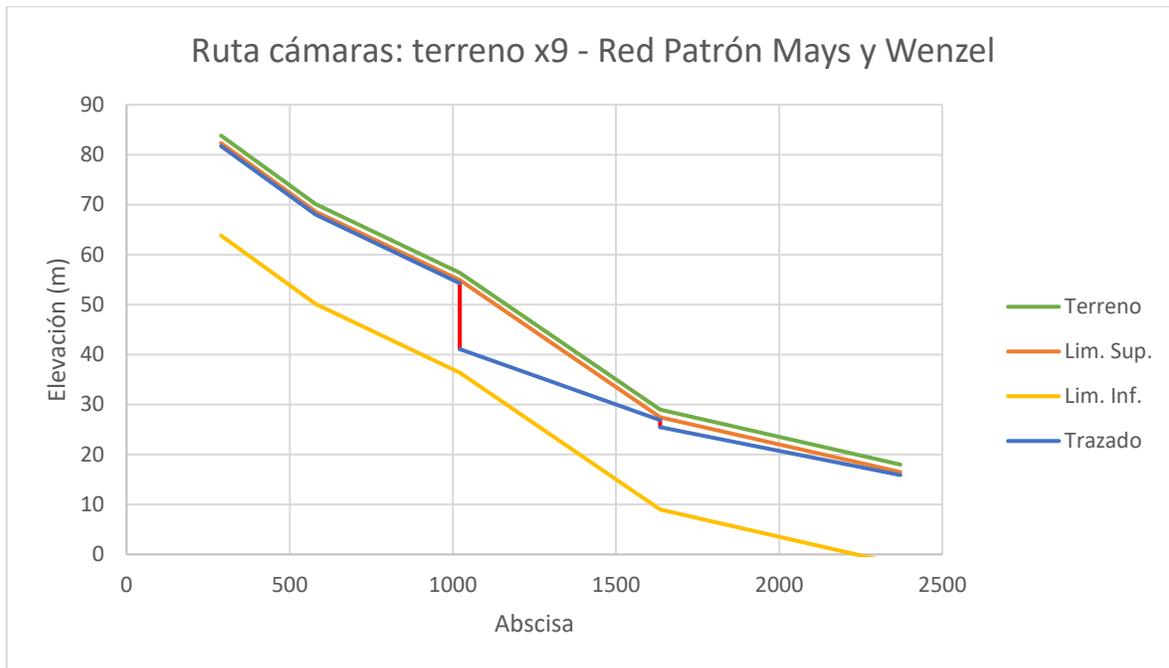


Min	0.046262
Prom	0.1217
Cámaras	
Número	2
Pozo	Altura (m)
14	13.2
18	1.4
Costo Cámaras (USD\$)	11797.3766
Costo total (USD\$)	465285.72

Debido a que en este terreno se presentaron cámaras de caída se muestra a continuación el perfil de la ruta que las contiene:

Tabla 62. Ruta Cámaras: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel

Terreno X9 - Red Patrón Mays y Wenzel			
Tubería		Elevación (m)	
Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
9	10	81.72	68.00
10	14	68.00	54.29
14	18	41.09	26.86
18	19	25.46	15.88



Gráfica 83. Ruta Cámaras: Terreno x9 - Red patrón Mays y Wenzel

A diferencia de la red Miraflores los pozos en los cuales se presentan las cámaras de caída tiene más de una conexión, por lo que a continuación se muestran todas las tuberías que entran o salen de dichos pozos (pozo 14 y 18):

Tabla 63. Conexiones a las cámaras de caída - Terreno X9 - Red patrón Mays y Wenzel

	Red patrón Mays y Wenzel			
	Tubería		Elevación (m)	
	Pozo i	Pozo j	Zi	Zj
Terreno X9	10	14	68.00	54.29
	13	14	68.00	54.29
	14	18	41.09	26.86
	17	18	40.57	26.86
	18	19	25.46	15.88

4.4.7 Resultados globales – Red Patrón de Mays y Wenzel

A continuación, se muestran los resultados globales:

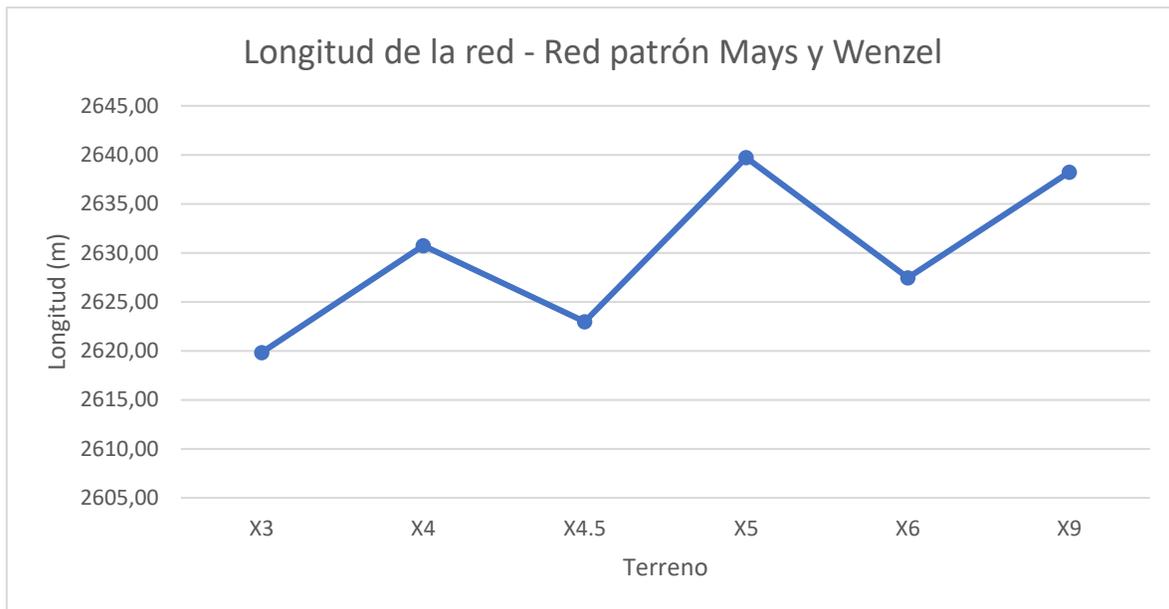


Primero, se muestra la profundidad máxima utilizada en cada diseño:

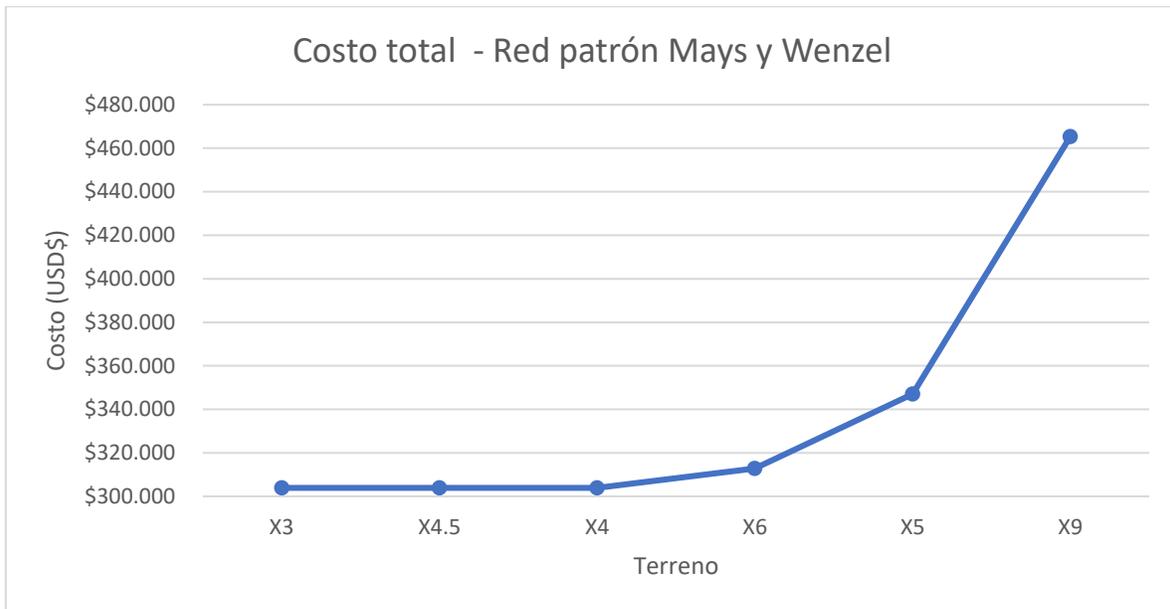
Tabla 64. Profundidad máxima - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel	
Terreno	Profundidad máxima (m)
X3	5
X4	5
X4.5	5
X5	5
X6	7.5
X9	20

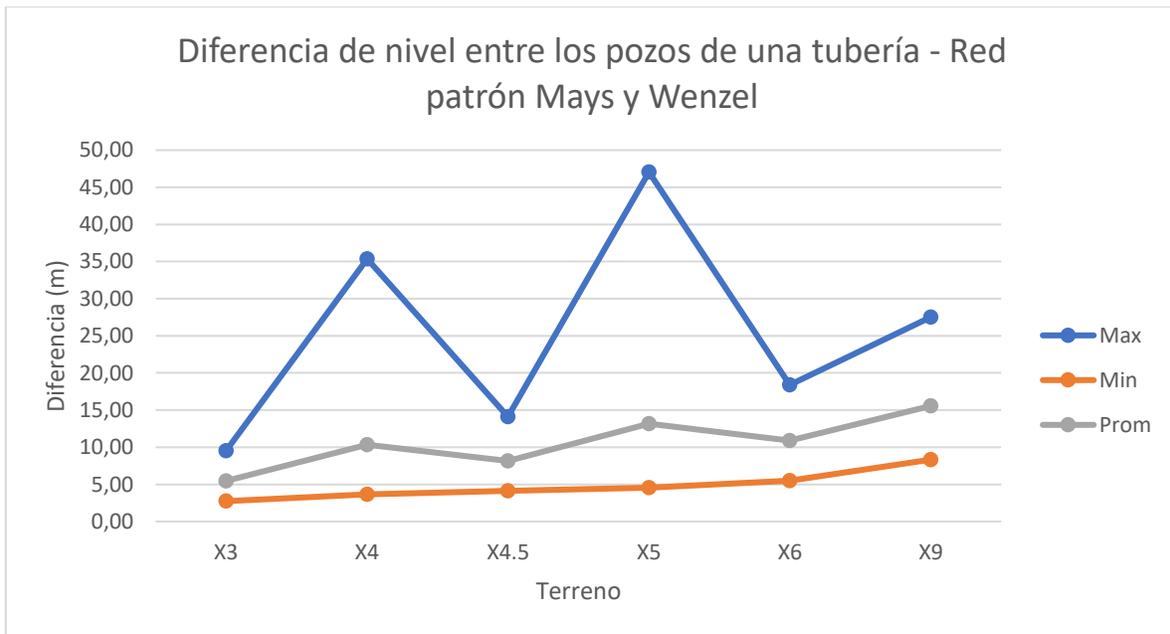
Seguidamente, se muestran los demás resultados:



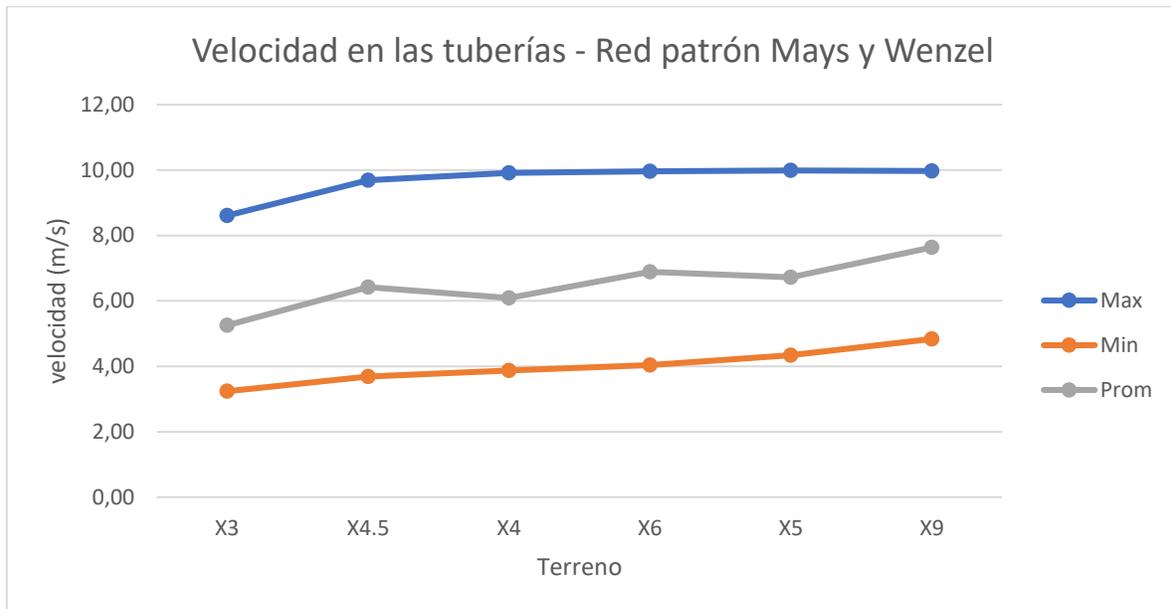
Gráfica 84. Longitud de la red - Red patrón Mays y Wenzel



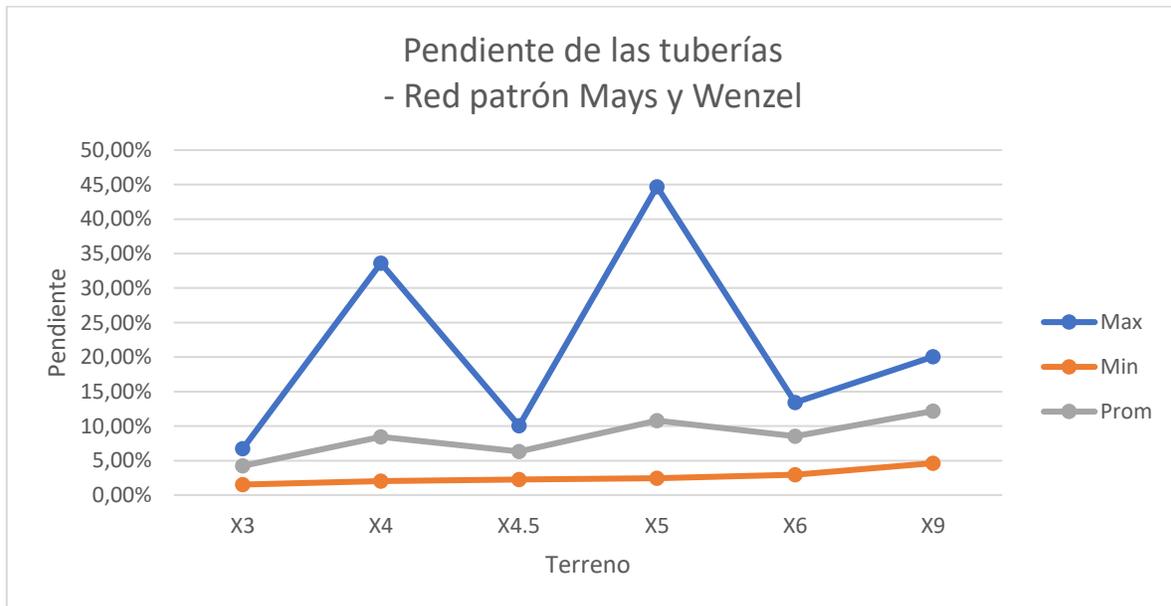
Gráfica 85. Costo total - Red patrón Mays y Wenzel



Gráfica 86. Diferencia de nivel - Red patrón Mays y Wenzel



Gráfica 87. Velocidad en las tuberías - Red patrón Mays y Wenzel



Gráfica 88. Pendiente de las tuberías - Red patrón Mays y Wenzel

Por último, se muestran los costos obtenidos a manera de tabla. Se indica el porcentaje que representan las cámaras de caída en el costo total:



Tabla 65. Costos - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel				
Terreno	Costo T y E (USD\$)	Costo Cámaras (USD\$)	Costo total (USD\$)	Porcentaje cámaras
X3	\$ 303,900	-	\$ 303,900	0%
X4.5	\$ 303,900	-	\$ 303,900	0%
X4	\$ 303,900	-	\$ 303,900	0%
X6	\$ 311,336	\$ 1,437	\$ 312,772	0.46%
X5	\$ 343,824	\$ 3,156	\$ 346,980	0.91%
X9	\$ 453,488	\$ 11,797	\$ 465,286	2.54%

4.4.8 Diámetros obtenidos – Red Patrón de Mays y Wenzel

Se muestran los diámetros obtenidos en los diseños realizados:

Tabla 66. Diámetros obtenidos - Red patrón Mays y Wenzel

Red patrón Mays y Wenzel			
Terreno	Diámetros Menores	Diámetros Medianos	Diámetros Grandes
X3	4	12	4
X4	4	12	4
X4.5	4	12	4
X5	4	8	8
X6	4	10	6
X9	5	14	1

5 Análisis de Resultados

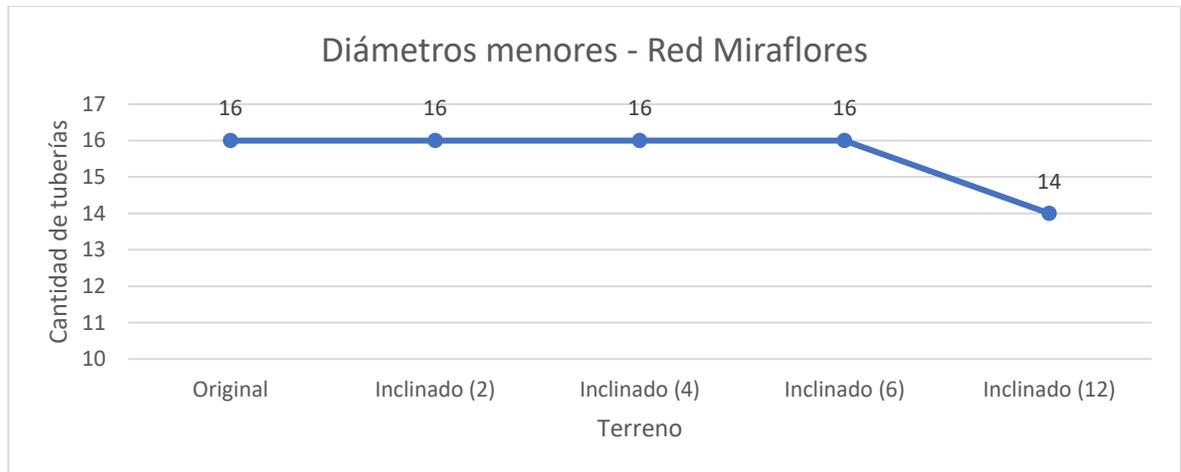
- Cuando se generan cámaras de caída en la red Miraflores y la red patrón de Mays y Wenzel, la tubería o las tuberías que entran al nodo de dicha cámara son las que tienen la mayor elevación, mientras que la tubería de salida posee una elevación menor. Esto no sucede en la red Chicó Sur (red que no presenta cámaras de caída en ninguno de los terrenos en los cuales se diseñó) en cambio en esta red se da que un nodo puede tener dos tuberías entrando, ambas con elevaciones diferentes, a la par que una tubería saliendo con una elevación que sea igual a alguna de las tuberías de entrada.



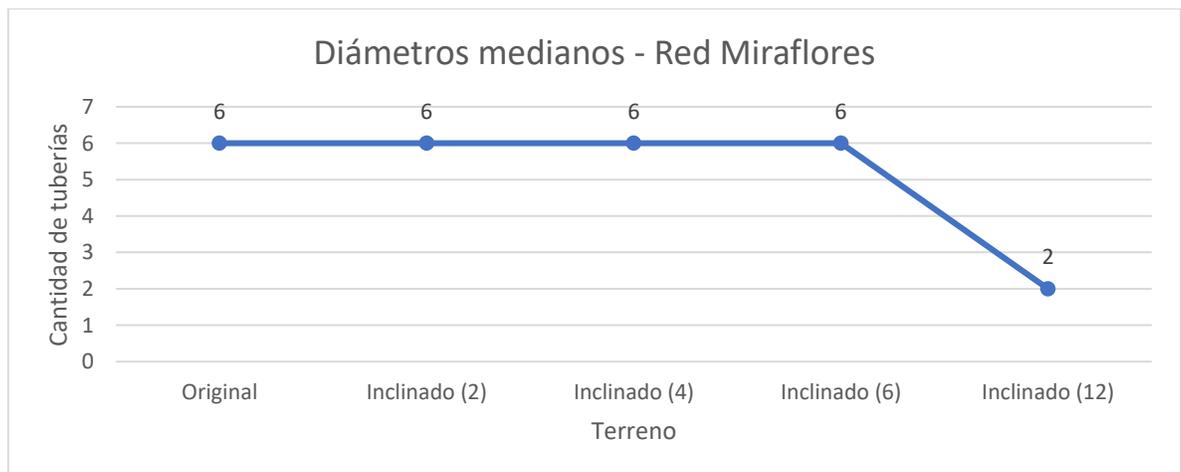
- En los diseños realizados en la red Miraflores y la red patrón de Mays y Wenzel se puede observar que al aumentar la pendiente de un terreno en cuyo diseño se hayan obtenido cámaras de caída, el diseño del nuevo terreno presenta estas estructuras en los mismos pozos que su predecesor, pero con una altura de caída de mayor.
- Siempre que se inclinaron los terrenos utilizando la metodología de Noriega (2020), la longitud total de la red aumentó, aunque no severamente. Se puede visualizar esto con la red Chicó Sur, cuyo terreno original posee una longitud total de tuberías de 15947.478 m mientras que el diseño obtenido en el terreno inclinado (18) obtuvo una longitud total de 15965.50 m (diferencia de 18.027 m).
- Como se puede visualizar en las gráficas de la ruta más larga en los terrenos de la red Chicó Sur, la ruta de las cámaras de caída de la red Miraflores y la red patrón de Mays y Wenzel e incluso en la ruta más baja de la red patrón de Li y Matthew, UTOPIA no utiliza toda la profundidad máxima que el usuario da como dato de entrada. De hecho, dicha profundidad máxima solo se llega a tocar en uno o dos pozos de la red como lo demostraron los resultados de la red patrón de Li y Matthew.
- En los resultados globales presentados a manera de gráfica (costo, longitud, velocidad, diferencia de nivel entre los pozos, pendiente) es posible ver como hay cambios bruscos de pendiente debido al uso de la metodología de Noriega (2020). Este comportamiento es debido a que, al ser una metodología de variación lineal, ocasiona que los resultados tengan dichos cambios de pendiente al no seguir una secuencia clara en los ‘pasos’ usados. Para notar esto solo es necesario ver el comportamiento (la pendiente) de los resultados cuando estos van de un terreno inclinado (2) a un terreno inclinado (4) y a un posterior terreno inclinado (6) y contrastarlo cuando se pasa del último mencionado a un terreno inclinado (12).
- En todas las redes diseñadas los resultados de pendiente de las tuberías y diferencia de nivel entre los pozos de una tubería siguen exactamente el mismo comportamiento a lo largo de todos los terrenos.
- La velocidad en las tuberías puede o no seguir el mismo comportamiento de la pendiente de las tuberías y la diferencia de nivel entre los pozos de una tubería. Lo anterior depende de la inclinación (pendiente) del terreno, donde esta puede ser muy baja, como en la red patrón Li y Matthew, donde se puede ver que la velocidad tiene generalmente un comportamiento constante y paralelo al eje x o, como en la red Miraflores y la red patrón de Mays y Wenzel, donde la pendiente es tan alta que ocasiona que el valor de velocidad máxima obtenido en las tuberías se acerque al valor máximo permitido por el RAS (10 m/s), esta cercanía da lugar a que la gráfica del valor máximo se aproxime de manera asintótica a dicho valor. Por otro lado, en la red Chicó Sur la velocidad, la pendiente y la diferencia de nivel sí siguen el mismo comportamiento.



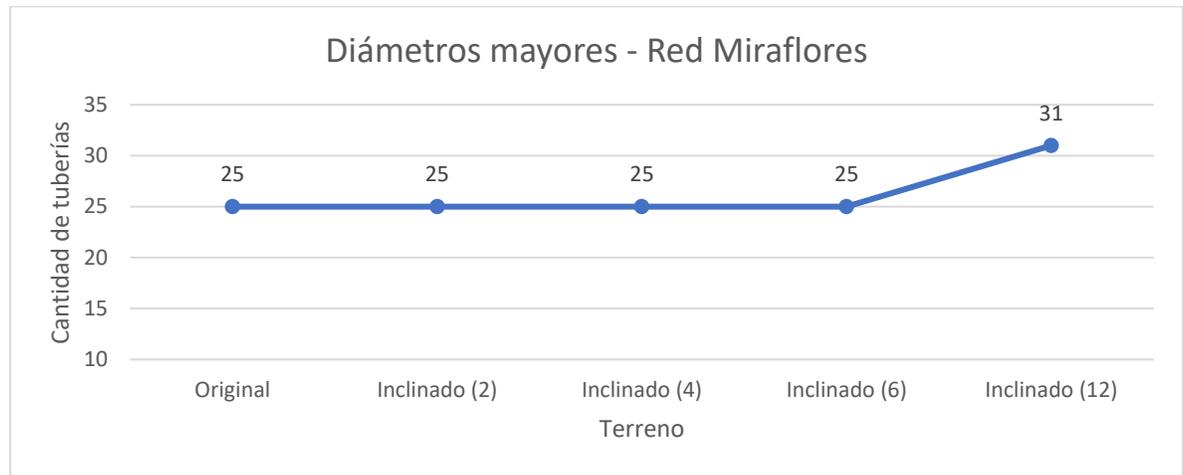
- Como se puede observar en la red Miraflores, al tener un terreno muy inclinado como lo es el terreno inclinado (12) de dicha red las cámaras de caída pueden representar un porcentaje importante del costo total (13% en este caso).
- La única red que mostró un comportamiento claro en la distribución de los diámetros en las tuberías fue la red Miraflores:



Gráfica 89. Diámetros menores - Red Miraflores



Gráfica 90. Diámetros medianos - Red Miraflores



Gráfica 91. Diámetros mayores - Red Miraflores

Este comportamiento consistente puede deberse tanto a que es la única red cuyo caudal de entrada es igual en todos los nodos ($0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) como a que es una red simple, que consta básicamente de cuatro series de tuberías.

6 Conclusiones y recomendaciones

- UTOPIA tiene en cuenta que se pueden generar cámaras de caída por lo que permite que para un mismo nodo puedan existir dos elevaciones distintas. Sin embargo, para que el programa cree y reconozca una cámara de caída es necesario que las tuberías que entran al nodo presenten la misma elevación mientras que la o las tuberías de salida presenten una elevación igual entre ellas y menor que la elevación de las tuberías de entrada. Al no cumplirse las condiciones previamente dichas la cámara no es creada como tal y su costo no es tenido en cuenta en el diseño final.
- El límite inferior, es decir, la profundidad máxima a la cual puede estar la tubería no tiene incidencia en la creación de cámaras de caída, es el límite superior (la profundidad mínima) el que influye u obliga la creación de estas estructuras.
- El aumento en la inclinación del terreno ocasiona que la distancia entre pozos se incremente. Por tal motivo, las tuberías se ven en la necesidad de extenderse más que en el diseño obtenido en el terreno original. Dicha extensión de las tuberías da como resultado el aumento en la longitud de la red.
- Aunque se hayan encontrado pequeños aumentos en la longitud total de la red a medida que se inclinaba el terreno, los costos totales incrementaron a un ritmo mucho más alto, indicando que el factor decisivo en el costo de la red no son las tuberías sino la excavación del terreno.



- Debido a que la función de costos utilizada (ecuación de Maurer) tiene en cuenta el parámetro de excavación, UTOPIA realiza los diseños tratando de disminuir la profundidad de las tuberías. Por lo anterior, la profundidad máxima que el usuario ingresa como dato de entrada en el programa solo cumple la función de permitir que el trazado sea factible. Por lo tanto, se recomienda diseñar las mismas redes utilizando ecuaciones de costos diferentes con el fin de analizar tanto la profundidad máxima obtenida en el diseño como la profundidad que el usuario ingresa al programa.
- Como se puede notar en las profundidades máximas utilizadas (valores que se presentan en la sección de resultados globales de todas las redes diseñadas), es necesario incrementar la profundidad máxima a medida que se inclina el terreno de una red. Lo anterior indica que al aumentar la inclinación del terreno se debe enterrar más las tuberías para que su diseño sea posible.
- El hecho de que al diseñar un terreno inclinado en cuyo diseño previo se hayan obtenido cámaras de caída y que en el nuevo diseño se obtengan las mismas estructuras en los mismos pozos, sugiere que: Al tener dos terrenos, con distribución de pozos similar, pero con inclinaciones diferente, se pueda predecir la aparición de cámaras de caída en uno de los terrenos si se tiene el diseño del otro.
- Se recomienda realizar más estudios sobre la distribución de diámetros en la red a medida que se inclina el terreno a la par que se estandariza el caudal de entrada en todos los pozos.

Finalmente, se puede decir que se cumplieron los objetivos propuestos al diseñar las redes reales de Chicó Sur y Miraflores y la red patrón de Li y Matthew junto con la red patrón de Mays y Wenzel. Los resultados encontrados muestran la importancia de las cámaras de caída, tanto en su función hidráulica como en su relevancia en el costo del trazado.

A su vez, se recomienda seguir trabajando en el desarrollo del programa UTOPIA, un cambio provechoso que se podría realizar en él es el de permitir al usuario, por medio de una interfaz más amigable, cambiar parámetros como las restricciones de diseño que se mencionan en este documento y la función de costos utilizada. Del mismo modo es importante que el programa siempre reconozca la existencia de una cámara de caída al haber un nodo o pozo con elevaciones distintas.



7 Referencias

- Butler, D. & Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Third Edition ed. New York: Spon Press.
- Cardona, C., Saldarriaga, J.(2019). *Diseño Optimizado de RDU en terrenos con altas pendientes y usando cámaras de caída estándar*. Bogotá: Uniandes, 2019.
- CIACUA. (2020). *Manual de UTOPIA*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Duque Villarreal, N., Saldarriaga, J., & Duque, D. (2015). *Metodología para el Diseño Optimizado de Redes de Alcantarillado*. Bogotá: Uniandes, 2015.
- González, S., Saldarriaga, J.(2016). *Entendimiento del Flujo Cuasicrítico y su Efecto Sobre el Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano*. Bogotá: Uniandes, 2016.
- Li, G.; Matthew, R.G.S. (1990). *New approach for optimization of urban drainage systems*. *Journal of Environmental Engineering*.
- M. Maurer, A. Scheidegger & A. Herlyn (2013) *Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer infrastructure model*, *Urban Water Journal*.
- Marú, A. (2018). *Diseño optimizado de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado incluyendo estructuras de caída*. Bogotá: Uniandes, 2018.
- Mays, L.W. & Wenzel, H.G. (1976). *Optimal Design of Multilevel Branching Sewer Systems*. *Water Resources Research*.
- Noriega, N., Saldarriaga, J.(2020). *Diseño Optimizado de redes de drenaje urbano: análisis de sensibilidad de restricciones de diseño y variación topográfica*. Bogotá: Uniandes, 2020.
- Peinado, C. (2014). *Uso del programa CIE-AGUA para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. Redes patrón para Colombia*. Bogotá: Uniandes, 2014.
- RAS, 2016. *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. s.l.: Ministerio de Desarrollo Económico: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Saldarriaga, J. (2020). *Clase de Sistemas de Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Vargas, K., Saldarriaga, J.(2016). *Diseño Optimizado de Redes de Drenaje Urbano Utilizando Criterios Hidráulicos*. Bogotá: Uniandes, 2016.



8 Anexos

Anexo A: Red Miraflores

Tabla 67. Caudal y coordenadas de la red Miraflores

Pozo	Qentrada (m ³ /s)	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	0.01	0	237.83	1477
2	0.01	16.69	249.74	1474.41
3	0.01	83.09	298.72	1469
4	0.01	134.14	340.36	1460
5	0.01	219.68	376.69	1446.5
6	0.01	239.76	361.78	1441
7	0.01	296.85	322.15	1443.5
8	0.01	368.35	274.71	1440
9	0.01	148.34	70.44	1488.5
10	0.01	219	118.8	1463.5
11	0.01	285.08	195.68	1449.5
12	0.01	372.01	272.32	1440
13	0.01	417.55	342.34	1429
14	0.01	444.31	360.68	1424.5
15	0.01	464.28	374.48	1419.72
16	0.01	502.45	400.59	1416.8
17	0.01	582.28	455.45	1398.5
18	0.01	595.37	463.22	1395.29
19	0.01	622.06	479.15	1386.5
20	0.01	698.57	524.51	1371
21	0.01	713.12	536.86	1361.2
22	0.01	734.48	554.81	1358
23	0.01	776.86	589.89	1329.7
24	0.01	806.63	615.16	1323.5
25	0.01	814.17	633.91	1315.3
26	0.01	829.03	671.02	1310.5
27	0.01	839.6	688.21	1305.7
28	0.01	880.92	756.09	1298.4
29	0.01	961.2	717.02	1300.35
30	0.01	1068	681.6	1293.31



31	0.01	1146.82	650.82	1281.26
32	0.01	1198.77	629.89	1281.35
33	0.01	789.62	0	1441.25
34	0.01	793.11	9.35	1435.5
35	0.01	803.4	37.53	1430
36	0.01	810.59	56.24	1424
37	0.01	828.17	101.26	1415.3
38	0.01	873.09	155.54	1405.3
39	0.01	901.82	170.3	1403
40	0.01	921.82	203.86	1396
41	0.01	968.72	285.99	1381.7
42	0.01	1040.67	334.61	1359
43	0.01	1138.57	420.7	1326.3
44	0.01	1199.77	457.97	1311.5
45	0.01	1262.72	483.9	1300.26
46	0.01	1256.27	544.61	1284.24
47	0.01	1240.4	595.16	1276.14
48	-0.47	1380.61	565.52	1271.5

Tabla 68. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red Miraflores

Pozo	Coordenada Z			
	Inclinado (2)	Inclinado (4)	Inclinado (6)	Inclinado (12)
1	1559.2	1641.4	1723.6	1970.2
2	1555.574	1636.738	1717.902	1961.394
3	1548	1627	1706	1943
4	1535.4	1610.8	1686.2	1912.4
5	1516.5	1586.5	1656.5	1866.5
6	1508.8	1576.6	1644.4	1847.8
7	1512.3	1581.1	1649.9	1856.3
8	1507.4	1574.8	1642.2	1844.4
9	1575.3	1662.1	1748.9	2009.3
10	1540.3	1617.1	1693.9	1924.3



11	1520.7	1591.9	1663.1	1876.7
12	1507.4	1574.8	1642.2	1844.4
13	1492	1555	1618	1807
14	1485.7	1546.9	1608.1	1791.7
15	1479.008	1538.296	1597.584	1775.448
16	1474.92	1533.04	1591.16	1765.52
17	1449.3	1500.1	1550.9	1703.3
18	1444.806	1494.322	1543.838	1692.386
19	1432.5	1478.5	1524.5	1662.5
20	1410.8	1450.6	1490.4	1609.8
21	1397.08	1432.96	1468.84	1576.48
22	1392.6	1427.2	1461.8	1565.6
23	1352.98	1376.26	1399.54	1469.38
24	1344.3	1365.1	1385.9	1448.3
25	1332.82	1350.34	1367.86	1420.42
26	1326.1	1341.7	1357.3	1404.1
27	1319.38	1333.06	1346.74	1387.78
28	1309.16	1319.92	1330.68	1362.96
29	1311.89	1323.43	1334.97	1369.59
30	1302.034	1310.758	1319.482	1345.654
31	1285.164	1289.068	1292.972	1304.684
32	1285.29	1289.23	1293.17	1304.99
33	1509.15	1577.05	1644.95	1848.65
34	1501.1	1566.7	1632.3	1829.1
35	1493.4	1556.8	1620.2	1810.4
36	1485	1546	1607	1790
37	1472.82	1530.34	1587.86	1760.42
38	1458.82	1512.34	1565.86	1726.42
39	1455.6	1508.2	1560.8	1718.6
40	1445.8	1495.6	1545.4	1694.8
41	1425.78	1469.86	1513.94	1646.18
42	1394	1429	1464	1569
43	1348.22	1370.14	1392.06	1457.82
44	1327.5	1343.5	1359.5	1407.5
45	1311.764	1323.268	1334.772	1369.284
46	1289.336	1294.432	1299.528	1314.816



47	1277.996	1279.852	1281.708	1287.276
48	1271.5	1271.5	1271.5	1271.5

Anexo B: Red Chicó Sur

Tabla 69. Caudal y coordenadas de la red Chicó Sur

Pozo	Qentrada (m ³ /s)	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	0.012400958	2145.39	7352.39	2561.931
2	0.022192382	1982.51	7441.01	2558.897
3	0.021701941	1784.49	7532.93	2557.411
4	0.020854894	1632.28	7617.99	2557.418
5	0.015663607	1452.89	7704.76	2555.874
6	0.011943601	1317.86	7779.49	2554.951
7	0.011012032	2233.12	7204.6	2568.56
8	0.015199155	2097.16	7271.09	2563.112
9	0.013337495	1932.99	7372.47	2557.932
10	0.01345158	1835.94	7416.57	2557.326
11	0.017623757	1747.32	7462.52	2556.901
12	0.014299892	1650.5	7499.21	2556.719
13	0.017089846	1588	7531.5	2556.617
14	0.01273396	1524.17	7564.57	2555.869
15	0.012588344	1460.84	7597.47	2555.782
16	0.012598533	1397.46	7630.55	2555.37
17	0.009447765	1333.26	7661.29	2554.93
18	0.00941501	1202.87	7770.98	2553.848
19	0.011175553	2204.2	7149.6	2570.034
20	0.019790916	2065.54	7218.98	2564.849
21	0.0099981	1996.74	7259.19	2559.695
22	0.018613464	1880.41	7313.67	2558.696
23	0.013049064	1803.79	7353.82	2557.337
24	0.013049064	1715.03	7400.08	2556.997
25	0.008615364	1144.17	7710.55	2554.375
26	0.011732404	2157.49	7087.17	2572.998
27	0.016332911	2093.6	7119.76	2568.046



28	0.02037807	2029.41	7153.1	2565.707
29	0.01303734	1963.14	7187.67	2562.876
30	0.0165344	1905.84	7224.42	2560.929
31	0.020834856	1831.54	7256.25	2559.406
32	0.012810424	1765.15	7289.85	2557.904
33	0.012810424	1681.29	7333.85	2557.165
34	0.009340351	1600.04	7388.1	2557.143
35	0.013588818	1544.46	7448.03	2556.112
36	0.013617913	1481.47	7481.98	2555.688
37	0.009289556	1419.46	7517.89	2555.843
38	0.009296411	1356.12	7550.7	2555.253
39	0.013288648	1279.69	7558.36	2554.687
40	0.012267327	1197.64	7600.63	2554.587
41	0.012556014	1114.68	7643.68	2554.288
42	0.008729659	1917.32	7098.98	2564.332
43	0.013422402	1735.7	7224.2	2558.971
44	0.013141514	1645.68	7265.07	2557.403
45	0.012711289	1548.16	7315.99	2556.96
46	0.017777149	1491.4	7345.58	2556.454
47	0.018236262	1427.55	7377.92	2555.928
48	0.018370232	1364.27	7411.31	2555.472
49	0.01837148	1300.92	7444.2	2554.961
50	0.008872512	1237.38	7477.06	2554.756
51	0.016728377	1155.71	7519.68	2554.232
52	0.020233634	1072.14	7561.27	2553.849
53	0.008365385	1004.44	7596.19	2553.74
54	0.011732404	2090.9	6933.35	2575.891
55	0.012025229	2013.31	6965.14	2569.708
56	0.016070389	1954.28	7002.5	2566.975
57	0.017230727	1882.86	7032.93	2565.49
58	0.004091102	1826.73	7064.1	2564.635
59	0.016082523	1746.82	7099.01	2562.239
60	0.01772972	1686.22	7129.44	2560.503
61	0.013141151	1599.01	7175.99	2558.144
62	0.013084203	1508.1	7223.4	2557.705
63	0.01266633	1456.74	7260.95	2557.014



64	0.013044626	1381.43	7289.2	2556.292
65	0.013053656	1318.17	7322.35	2555.571
66	0.013058238	1254.73	7355.18	2555.035
67	0.01305162	1191.38	7388.1	2554.884
68	0.008782139	1109.34	7429.94	2554.654
69	0.008365385	962.53	7514.74	2553.565
70	0.008615364	2056.96	6866.81	2576.088
71	0.01707194	2002.76	6889.27	2570.153
72	0.012756206	1920.35	6933.78	2567.7
73	0.017888459	1832.9	6975.88	2565.94
74	0.009121041	1728.08	7031.72	2563.69
75	0.016487907	1649.08	7068.52	2561.041
76	0.017429409	1559.39	7112.63	2559.038
77	0.016869064	1471.37	7158.01	2557.989
78	0.008293698	1393.92	7198.28	2557.27
79	0.013042037	1305.24	7244.35	2555.823
80	0.008615364	1230.89	7282.92	2555.429
81	0.016948665	1155.26	7322.23	2555.309
82	0.016444565	1076.77	7368.03	2554.962
83	0.020020955	992.3	7407.29	2554.092
84	0.012570346	913.3	7446.36	2554.134
85	0.008666138	826.81	7493.27	2553.36
86	0.017259524	1958.45	6815.65	2573.027
87	0.025753805	1785.75	6898.33	2566.152
88	0.017171279	1604.82	6992.61	2561.961
89	0.0087311	1530.58	7035.67	2559.863
90	0.017008072	1434.47	7086.98	2558.709
91	0.024561846	1268.27	7173.47	2556.416
92	0.016045263	1116	7247.09	2555.268
93	0.008267447	1035.11	7288.28	2554.513
94	0.017137847	955.69	7336.9	2553.91
95	0.016869298	788.2	7419.13	2553.048
96	0.012737724	1910.25	6726.98	2575.185
97	0.02123197	1744.42	6812.62	2569.264
98	0.017690441	1569.16	6903.75	2564.488
99	0.013327604	1475.04	6952.68	2560.781



100	0.01301241	1391.34	6997.48	2559.995
101	0.008285369	1302.31	7041.85	2558
102	0.015985974	1224.8	7082.59	2555.326
103	0.016365209	1071.64	7162.13	2554.815
104	0.012759341	981.54	7207.82	2554.22
105	0.012874963	901.3	7249.35	2552.046
106	0.008821581	831.25	7286.18	2551.715
107	0.01311833	741.36	7334.18	2551.63
108	0.008398784	667.44	7367.24	2551.463
109	-1.51798782	584.86	7408.61	2551.851

Tabla 70. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red Chicó Sur

Pozo	Coordenada Z				
	Inclinado (2)	Inclinado (4)	Inclinado (6)	Inclinado (12)	Inclinado (18)
1	2566.1182	2570.3054	2574.4926	2587.0542	2599.6158
2	2561.8706	2564.8442	2567.8178	2576.7386	2585.6594
3	2559.7902	2562.1694	2564.5486	2571.6862	2578.8238
4	2559.8	2562.182	2564.564	2571.71	2578.856
5	2557.6384	2559.4028	2561.1672	2566.4604	2571.7536
6	2556.3462	2557.7414	2559.1366	2563.3222	2567.5078
7	2575.3988	2582.2376	2589.0764	2609.5928	2630.1092
8	2567.7716	2572.4312	2577.0908	2591.0696	2605.0484
9	2560.5196	2563.1072	2565.6948	2573.4576	2581.2204
10	2559.6712	2562.0164	2564.3616	2571.3972	2578.4328
11	2559.0762	2561.2514	2563.4266	2569.9522	2576.4778
12	2558.8214	2560.9238	2563.0262	2569.3334	2575.6406
13	2558.6786	2560.7402	2562.8018	2568.9866	2575.1714
14	2557.6314	2559.3938	2561.1562	2566.4434	2571.7306
15	2557.5096	2559.2372	2560.9648	2566.1476	2571.3304
16	2556.9328	2558.4956	2560.0584	2564.7468	2569.4352
17	2556.3168	2557.7036	2559.0904	2563.2508	2567.4112
18	2554.802	2555.756	2556.71	2559.572	2562.434
19	2577.4624	2584.8908	2592.3192	2614.6044	2636.8896
20	2570.2034	2575.5578	2580.9122	2596.9754	2613.0386



21	2562.9878	2566.2806	2569.5734	2579.4518	2589.3302
22	2561.5892	2564.4824	2567.3756	2576.0552	2584.7348
23	2559.6866	2562.0362	2564.3858	2571.4346	2578.4834
24	2559.2106	2561.4242	2563.6378	2570.2786	2576.9194
25	2555.5398	2556.7046	2557.8694	2561.3638	2564.8582
26	2581.612	2590.226	2598.84	2624.682	2650.524
27	2574.6792	2581.3124	2587.9456	2607.8452	2627.7448
28	2571.4046	2577.1022	2582.7998	2599.8926	2616.9854
29	2567.4412	2572.0064	2576.5716	2590.2672	2603.9628
30	2564.7154	2568.5018	2572.2882	2583.6474	2595.0066
31	2562.5832	2565.7604	2568.9376	2578.4692	2588.0008
32	2560.4804	2563.0568	2565.6332	2573.3624	2581.0916
33	2559.4458	2561.7266	2564.0074	2570.8498	2577.6922
34	2559.415	2561.687	2563.959	2570.775	2577.591
35	2557.9716	2559.8312	2561.6908	2567.2696	2572.8484
36	2557.378	2559.068	2560.758	2565.828	2570.898
37	2557.595	2559.347	2561.099	2566.355	2571.611
38	2556.769	2558.285	2559.801	2564.349	2568.897
39	2555.9766	2557.2662	2558.5558	2562.4246	2566.2934
40	2555.8366	2557.0862	2558.3358	2562.0846	2565.8334
41	2555.418	2556.548	2557.678	2561.068	2564.458
42	2569.4796	2574.6272	2579.7748	2595.2176	2610.6604
43	2561.9742	2564.9774	2567.9806	2576.9902	2585.9998
44	2559.779	2562.155	2564.531	2571.659	2578.787
45	2559.1588	2561.3576	2563.5564	2570.1528	2576.7492
46	2558.4504	2560.4468	2562.4432	2568.4324	2574.4216
47	2557.714	2559.5	2561.286	2566.644	2572.002
48	2557.0756	2558.6792	2560.2828	2565.0936	2569.9044
49	2556.3602	2557.7594	2559.1586	2563.3562	2567.5538
50	2556.0732	2557.3904	2558.7076	2562.6592	2566.6108
51	2555.3396	2556.4472	2557.5548	2560.8776	2564.2004
52	2554.8034	2555.7578	2556.7122	2559.5754	2562.4386
53	2554.6508	2555.5616	2556.4724	2559.2048	2561.9372
54	2585.6622	2595.4334	2605.2046	2634.5182	2663.8318
55	2577.006	2584.304	2591.602	2613.496	2635.39
56	2573.1798	2579.3846	2585.5894	2604.2038	2622.8182



57	2571.1008	2576.7116	2582.3224	2599.1548	2615.9872
58	2569.9038	2575.1726	2580.4414	2596.2478	2612.0542
59	2566.5494	2570.8598	2575.1702	2588.1014	2601.0326
60	2564.119	2567.735	2571.351	2582.199	2593.047
61	2560.8164	2563.4888	2566.1612	2574.1784	2582.1956
62	2560.2018	2562.6986	2565.1954	2572.6858	2580.1762
63	2559.2344	2561.4548	2563.6752	2570.3364	2576.9976
64	2558.2236	2560.1552	2562.0868	2567.8816	2573.6764
65	2557.2142	2558.8574	2560.5006	2565.4302	2570.3598
66	2556.4638	2557.8926	2559.3214	2563.6078	2567.8942
67	2556.2524	2557.6208	2558.9892	2563.0944	2567.1996
68	2555.9304	2557.2068	2558.4832	2562.3124	2566.1416
69	2554.4058	2555.2466	2556.0874	2558.6098	2561.1322
70	2585.938	2595.788	2605.638	2635.188	2664.738
71	2577.629	2585.105	2592.581	2615.009	2637.437
72	2574.1948	2580.6896	2587.1844	2606.6688	2626.1532
73	2571.7308	2577.5216	2583.3124	2600.6848	2618.0572
74	2568.5808	2573.4716	2578.3624	2593.0348	2607.7072
75	2564.8722	2568.7034	2572.5346	2584.0282	2595.5218
76	2562.068	2565.098	2568.128	2577.218	2586.308
77	2560.5994	2563.2098	2565.8202	2573.6514	2581.4826
78	2559.5928	2561.9156	2564.2384	2571.2068	2578.1752
79	2557.567	2559.311	2561.055	2566.287	2571.519
80	2557.0154	2558.6018	2560.1882	2564.9474	2569.7066
81	2556.8474	2558.3858	2559.9242	2564.5394	2569.1546
82	2556.3616	2557.7612	2559.1608	2563.3596	2567.5584
83	2555.1436	2556.1952	2557.2468	2560.4016	2563.5564
84	2555.2024	2556.2708	2557.3392	2560.5444	2563.7496
85	2554.1188	2554.8776	2555.6364	2557.9128	2560.1892
86	2581.6526	2590.2782	2598.9038	2624.7806	2650.6574
87	2572.0276	2577.9032	2583.7788	2601.4056	2619.0324
88	2566.1602	2570.3594	2574.5586	2587.1562	2599.7538
89	2563.223	2566.583	2569.943	2580.023	2590.103
90	2561.6074	2564.5058	2567.4042	2576.0994	2584.7946
91	2558.3972	2560.3784	2562.3596	2568.3032	2574.2468
92	2556.79	2558.312	2559.834	2564.4	2568.966



93	2555.733	2556.953	2558.173	2561.833	2565.493
94	2554.8888	2555.8676	2556.8464	2559.7828	2562.7192
95	2553.682	2554.316	2554.95	2556.852	2558.754
96	2584.6738	2594.1626	2603.6514	2632.1178	2660.5842
97	2576.3844	2583.5048	2590.6252	2611.9864	2633.3476
98	2569.698	2574.908	2580.118	2595.748	2611.378
99	2564.5082	2568.2354	2571.9626	2583.1442	2594.3258
100	2563.4078	2566.8206	2570.2334	2580.4718	2590.7102
101	2560.6148	2563.2296	2565.8444	2573.6888	2581.5332
102	2556.8712	2558.4164	2559.9616	2564.5972	2569.2328
103	2556.1558	2557.4966	2558.8374	2562.8598	2566.8822
104	2555.3228	2556.4256	2557.5284	2560.8368	2564.1452
105	2552.2792	2552.5124	2552.7456	2553.4452	2554.1448
106	2551.8158	2551.9166	2552.0174	2552.3198	2552.6222
107	2551.6968	2551.7636	2551.8304	2552.0308	2552.2312
108	2551.463	2551.463	2551.463	2551.463	2551.463
109	2552.0062	2552.1614	2552.3166	2552.7822	2553.2478

Anexo C: Red patrón Li y Matthew

Tabla 71. Caudal y coordenadas de la red patrón Li y Matthew

Pozo	Qentrada (m ³ /s)	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	0.00486	0	0	2002.65
2	0.00587	1030	0	2002.8
3	0.00971	790	0	2002.7
4	0.0174	490	0	2002.6
5	0.01012	190	250	2002.6
6	0.02789	490	250	2002.7
7	0.00587	0	0	2002.5
8	0.00768	-245	910	2002.25
9	0.01915	-245	560	2002.3
10	0.0081	190	250	2002.6
11	0.00992	-5	830	2002.4
12	0.0364	-5	560	2002.5



13	0.00749	215	800	2002.5
14	0.04978	215	560	2002.9
15	0.01316	630	330	2002.6
16	0.01987	870	330	2002.6
17	0.0089	1060	560	2002.8
18	0.00768	870	760	2002.6
19	0.04479	870	560	2002.8
20	0.10854	490	560	2002.85
21	0.11048	490	810	2002.6
22	0.00607	-480	710	2002.2
23	0.00566	-480	1650	2002.1
24	0.01173	-480	1370	2002.1
25	0.02232	-480	1010	2002.2
26	0.00364	-360	1500	2002
27	0.00263	120	1500	2002
28	0.01682	-130	1500	2002
29	0.02641	-130	1240	2002.4
30	0.00951	-130	780	2002.4
31	0.05567	-130	1010	2002.4
32	0.00992	170	1460	2002
33	0.01625	170	1270	2002.4
34	0.00627	170	830	2002.5
35	0.07919	170	1010	2002.5
36	0.00445	1475	1010	2002.3
37	0.01012	1185	1010	2002.35
38	0.00364	860	810	2002.6
39	0.00688	860	1220	2002.2
40	0.03114	860	1010	2002.4
41	0.19798	490	1010	2002.45
42	0.20115	490	1270	2002.25
43	0.00202	265	1500	2002
44	0.20736	490	1500	2001.95
45	0.00364	840	1680	2002.05
46	0.01214	840	1270	2002.2
47	0.22347	840	1500	2002
48	0.01953	1160	1060	2002.35



49	0.00384	1160	1790	2002.1
50	0.24158	1160	1500	2001.95
51	0.01373	1470	1060	2002.3
52	0.25045	1470	1500	2001.9
53	0.00324	450	2420	2002.2
54	0.0083	270	2420	2002.2
55	0.01295	0	2150	2002.2
56	0.01436	-270	1850	2002.2
57	0.00324	0	1600	2002
58	0.00647	810	1850	2002.1
59	0.00182	270	1710	2002
60	0.01334	270	1850	2002
61	0.03482	0	1850	2002.1
62	0.04424	270	2150	2002.1
63	0.00546	900	2420	2002.2
64	0.00788	550	2420	2002.2
65	0.00749	780	2150	2002.1
66	0.05779	550	2150	2002.2
67	0.06045	550	1850	2002.1
68	0.01072	870	2150	2002.1
69	0.00304	870	1700	2002
70	0.07295	870	1850	2002.1
71	0.0089	1160	2130	2002
72	0.08146	1160	1850	2002
73	0.31846	1470	1850	2002
74	0.00789	1210	2160	2002.1
75	0.32598	1470	2160	2002.1
76	0.00708	840	2460	2002.2
77	0.0083	1190	2230	2002.1
78	0.01798	1190	2460	2002.25
79	0.336	1470	2460	2002.2
80	-3.71948	1470	2960	2002.2

Tabla 72. Elevaciones obtenidas con la metodología de Noriega (2020) - Red patrón Li y Matthew

Pozo	Coordenada Z
------	--------------



	Inclinado (100)	Inclinado (200)	Inclinado (300)
1	2017.65	2032.65	2047.65
2	2020.8	2038.8	2056.8
3	2018.7	2034.7	2050.7
4	2016.6	2030.6	2044.6
5	2016.6	2030.6	2044.6
6	2018.7	2034.7	2050.7
7	2014.5	2026.5	2038.5
8	2009.25	2016.25	2023.25
9	2010.3	2018.3	2026.3
10	2016.6	2030.6	2044.6
11	2012.4	2022.4	2032.4
12	2014.5	2026.5	2038.5
13	2014.5	2026.5	2038.5
14	2022.9	2042.9	2062.9
15	2016.6	2030.6	2044.6
16	2016.6	2030.6	2044.6
17	2020.8	2038.8	2056.8
18	2016.6	2030.6	2044.6
19	2020.8	2038.8	2056.8
20	2021.85	2040.85	2059.85
21	2016.6	2030.6	2044.6
22	2008.2	2014.2	2020.2
23	2006.1	2010.1	2014.1
24	2006.1	2010.1	2014.1
25	2008.2	2014.2	2020.2
26	2004	2006	2008
27	2004	2006	2008
28	2004	2006	2008
29	2012.4	2022.4	2032.4
30	2012.4	2022.4	2032.4
31	2012.4	2022.4	2032.4
32	2004	2006	2008
33	2012.4	2022.4	2032.4
34	2014.5	2026.5	2038.5



35	2014.5	2026.5	2038.5
36	2010.3	2018.3	2026.3
37	2011.35	2020.35	2029.35
38	2016.6	2030.6	2044.6
39	2008.2	2014.2	2020.2
40	2012.4	2022.4	2032.4
41	2013.45	2024.45	2035.45
42	2009.25	2016.25	2023.25
43	2004	2006	2008
44	2002.95	2003.95	2004.95
45	2005.05	2008.05	2011.05
46	2008.2	2014.2	2020.2
47	2004	2006	2008
48	2011.35	2020.35	2029.35
49	2006.1	2010.1	2014.1
50	2002.95	2003.95	2004.95
51	2010.3	2018.3	2026.3
52	2001.9	2001.9	2001.9
53	2008.2	2014.2	2020.2
54	2008.2	2014.2	2020.2
55	2008.2	2014.2	2020.2
56	2008.2	2014.2	2020.2
57	2004	2006	2008
58	2006.1	2010.1	2014.1
59	2004	2006	2008
60	2004	2006	2008
61	2006.1	2010.1	2014.1
62	2006.1	2010.1	2014.1
63	2008.2	2014.2	2020.2
64	2008.2	2014.2	2020.2
65	2006.1	2010.1	2014.1
66	2008.2	2014.2	2020.2
67	2006.1	2010.1	2014.1
68	2006.1	2010.1	2014.1
69	2004	2006	2008
70	2006.1	2010.1	2014.1



71	2004	2006	2008
72	2004	2006	2008
73	2004	2006	2008
74	2006.1	2010.1	2014.1
75	2006.1	2010.1	2014.1
76	2008.2	2014.2	2020.2
77	2006.1	2010.1	2014.1
78	2009.25	2016.25	2023.25
79	2008.2	2014.2	2020.2
80	2008.2	2014.2	2020.2

Anexo D: Red patrón Mays y Wenzel

Tabla 73. Caudal y coordenadas de la red patrón Mays y Wenzel con la pendiente aumentada 3 veces

Pozo	Qentrada (m ³ /s)	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	0.1132	0	0	152.4
2	0.085	0	106.68	147.828
3	0.0566	121.92	106.68	140.5128
4	0.1132	0	344.4361	143.256
5	0.1133	121.92	344.4361	138.684
6	0.1416	121.92	213.36	134.112
7	0.2265	141.9621	-30.48	143.256
8	0.1133	289.5996	-30.48	138.684
9	0.1132	289.5996	106.68	129.54
10	0.17	289.5996	213.36	124.968
11	0.2548	335.3196	472.44	138.684
12	0.1982	335.3196	320.04	129.54
13	0.1133	441.9996	320.04	124.968
14	0.1982	441.9996	213.36	120.396
15	0.1132	522.7716	-13.7891	123.1392
16	0.0567	522.7716	108.1309	119.4816
17	0.0849	614.2116	108.1309	115.824
18	0.1983	614.2116	213.36	111.252
19	0.0566	736.1316	213.36	107.5944



20	0.1416	736.1316	365.76	104.8512
21	-2.6617	922.6692	365.76	102.108

Tabla 74. Elevaciones obtenidas manualmente para aumentar la pendiente 4, 4.5, 5, 6 y 9 veces - Red patrón Mays y Wenzel

Pozo	Coordenada Z				
	X4	X4.5	X5	X6	X9
1	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4
2	146.304	145.542	144.78	143.256	138.684
3	136.5504	134.5692	132.588	128.6256	116.7384
4	149.352	138.684	149.352	134.112	124.968
5	143.256	131.826	141.732	124.968	111.252
6	128.016	124.968	121.92	115.824	97.536
7	149.352	138.684	149.352	134.112	124.968
8	143.256	131.826	141.732	124.968	111.252
9	131.064	118.11	126.492	106.68	83.82
10	115.824	111.252	106.68	97.536	70.104
11	147.828	131.826	147.828	124.968	111.252
12	135.636	118.11	132.588	106.68	83.82
13	129.54	111.252	124.968	97.536	70.104
14	109.728	104.394	99.06	88.392	56.388
15	142.6464	108.5088	142.6464	97.536	64.6176
16	137.7696	103.0224	136.5504	90.2208	53.6448
17	132.8928	97.536	130.4544	79.248	42.672
18	97.536	90.678	83.82	70.104	28.956
19	92.6592	85.1916	77.724	62.7888	17.9832
20	89.0016	81.0768	73.152	57.3024	9.7536
21	85.344	76.962	68.58	51.816	1.524