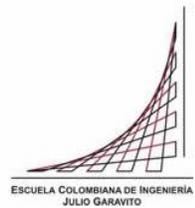


Maestría en Ingeniería Civil

**Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo,
Departamento de Cundinamarca, Colombia.**

Keila Paola Núñez Galeano

Bogotá, D.C., 26 de julio de 2021



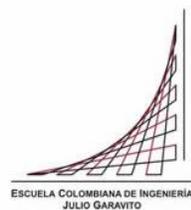
**Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo,
Departamento de Cundinamarca, Colombia.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.**

Héctor Matamoros Rodríguez

Director

Bogotá, D.C., 26 de julio de 2021



La tesis de maestría titulada “Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo, departamento de Cundinamarca, Colombia”, presentada por Keila Paola Núñez Galeano, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado

German Ricardo Santos Granados

Jurado

Jairo Alberto Romero Rojas

Bogotá, D.C., 26 de julio de 2021

A Dios, a mis padres y hermanos, quienes siempre me han apoyado en cada una de las metas propuestas en mi vida, y a mi tía quien desde el cielo me cuida.

Agradecimientos

Quiero manifestar mis agradecimientos al Ingeniero Héctor Matamoros Rodríguez, por su colaboración y orientación en este proceso, y a través de su conocimiento y experiencia me permitió desarrollar el presente trabajo de grado.

A las ingenieras del Laboratorio de Aguas del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

A todos los profesores del centro de Estudios Hidráulicos que contribuyeron en mi formación profesional.

Resumen

El río Lindo es un cuerpo hídrico natural localizado en el municipio de Viotá, se encuentra en el departamento de Cundinamarca al Sur occidente de Bogotá, D.C., sus aguas desembocan en el río Calandaima, su área es de aproximadamente 93.6 km² y la longitud del cauce principal es de 12.5 km; sus características del sistema de drenaje angulado, sinuosidad de 1.25, su cota de nacimiento 2147.4 m.s.n.m. y pendiente media 12.7%.

En la actualidad, una de las grandes preocupaciones es la contaminación de nuestras fuentes hídricas como los ríos, los canales, lagos, embalses etc., debido al gran demanda de población e industrias.

La problemática de las poblaciones pequeñas de Colombia es debido a la carencia de plantas de tratamientos de aguas residuales; el municipio de Viotá no cuenta con una PTAR, evidenciando la contaminación del río Lindo por el inadecuado vertimiento de los residuos líquidos domésticos que están dispuestas directamente sobre el cauce principal.

Hoy en día, las ventajas de la programación y del avance tecnológico se han convertido en una herramienta importante para el ser humano, desde construir modelos de calidad del agua que te permita evaluar diferentes escenarios, predecir el contenido futuro de varios contaminantes o parámetros y así, garantizar la toma de decisiones a la hora del manejo y control del recurso hídrico, además seleccionar un resultado óptimo, teniendo en cuenta los costos y beneficios.

Este documento presenta la modelación y calibración tanto hidráulica y calidad del agua del río Lindo mediante la aplicación del programa HEC-RAS para los parámetros de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno última carbonácea (DBOC), se desarrolló con la recopilación de información del cauce principal y su afluente, una campaña de muestreo, aforo, ensayo con trazadores y análisis de laboratorio.

El software HEC-RAS es un modelo unidimensional, es una herramienta útil, programa libre y de fácil manejo e interpretación para el cálculo, predicción y análisis de calidad del agua en cuerpos hídricos superficiales.

Con base a los análisis de laboratorio de las tomas de muestras a lo largo del río Lindo muestran que no cumplen con el acuerdo 043 del 2006 establecido por la CAR para un

cauce de clase I para aguas aptas para el consumo humano y domestico con tratamiento convencional, preservación de flora y fauna, uso agrícola y uso pecuario y las descargas no cumplen con la resolución 0631 de 2015 del Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los resultados obtenidos de las simulaciones de diferentes escenarios, se evidencia la disminución de las concentraciones de OD y el incremento DBOC, es claro la necesidad de aplicar o ejecutar alternativas que ayuden a disminuir notablemente las cargas contaminantes en el río Lindo.

Índice general

1	CAPÍTULO Introducción	23
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo general	24
1.1.2	Objetivos específicos.....	24
2	CAPÍTULO Conceptos básicos y marco teórico.....	25
2.1	Aspectos básicos sobre la contaminación del agua	25
2.1.1	Aguas residuales	25
2.1.2	Aguas residuales domesticas (ARD)	25
2.1.3	Aguas residuales municipales	26
2.1.4	Aguas crudas.....	26
2.1.5	Aguas negras	26
2.2	Mecanismos de transporte.....	26
2.2.1	Advección.....	27
2.2.2	Difusión	27
2.2.3	Dispersión	28
2.3	Ensayos de trazadores	29
2.3.1	Efectividad de ensayos con trazadores.....	30
2.4	Modelos de transporte de solutos	30
2.4.1	Modelo de la zona muerta agregada – ADZ	31
2.5	Modelos de calidad del agua	34
2.5.1	Utilidad de los modelos de calidad del agua	34
2.5.2	Tipos de estudios	35
2.6	Parámetros analizados	37
2.6.1	Oxígeno disuelto (OD)	37
2.6.2	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	38

2.6.3	Comportamiento del OD y la DBO en un cuerpo de agua.....	40
2.7	Descripción del modelo computacional.....	48
2.7.1	Programa HEC-RAS.....	48
2.8	Marco legal.....	70
2.9	Metodología de la investigación.....	72
3	CAPÍTULO Descripción de la zona de estudio.....	74
3.1	Localización general del área de estudio.....	74
3.2	Climatología.....	77
3.2.1	Precipitación media mensual multianual.....	79
3.2.2	Temperatura media mensual multianual.....	80
3.2.3	Humedad relativa media mensual multianual.....	81
3.2.4	Brillo solar.....	82
3.2.5	Caracterización climática.....	82
3.3	Geología.....	82
3.3.1	Estratigrafía.....	83
3.4	Descripción del tramo de estudio.....	84
4	CAPÍTULO Características generales de la salida de campo y laboratorio.....	89
4.1	Actividades preliminares.....	89
4.2	Aforo.....	91
4.2.1	Datos obtenidos del flowtracker 2.....	92
4.3	Método volumétrico para las descargas.....	101
4.4	Conductividad.....	104
4.4.1	Calibración equipos de medición para el trazador.....	106
4.4.2	Valores del trazador.....	110
4.4.3	Coeficiente de dispersión longitudinal.....	112
4.5	Plan de muestreo.....	115

4.5.1	Diseño de la red de monitoreo	115
4.5.2	Muestreo	116
4.6	Análisis de laboratorio	117
5	CAPÍTULO Análisis de caudales de la cuenca	126
5.1	Morfología de la cuenca de estudio	128
5.2	Metodología del número de curva CN, del SCS.....	138
5.2.1	Clasificación hidrológica de los suelos.....	140
5.2.2	Uso y tratamiento del suelo	140
5.2.3	Condición hidrológica	141
5.2.4	Condición de humedad antecedente	142
5.2.5	Número de curva	142
5.3	Tiempo de concentración.....	143
5.3.1	Tc de la Quebrada San Juan	143
5.3.2	Tc de la Quebrada Pilama	144
5.3.3	Tc del río Lindo.....	145
5.4	Precipitación.....	146
5.5	Tormenta de aplicación	147
5.6	Modelo hidrológico.....	147
5.7	Resultados	150
5.8	Cálculo del índice $7Q_{10}$	152
6	CAPÍTULO Proyección de población	156
6.1	Población municipio de Viotá.....	156
6.1.1	Método del crecimiento lineal (crecimiento aritmético).....	157
6.1.2	Método del crecimiento geométrico	158
6.1.3	Método del crecimiento logarítmico	160
6.1.4	Método wappus caso 1 (promedio proyecciones)	161

6.1.5	Método wappus caso 2 (promedio tasas)	162
6.1.6	Proyecciones por métodos de mínimos cuadrados.....	163
6.1.7	Resultados de las proyecciones	166
6.1.8	Proyecciones de población municipio de Viotá	169
7	CAPÍTULO Estudio topobatimétrico.....	170
7.1	Levantamiento topobatimétrico	170
7.2	Procesamiento de la información.....	170
7.3	Redes irregulares de triángulos (TIN)	171
8	CAPÍTULO Modelación: componente hidráulico	173
8.1	Desarrollo del modelo hidráulico.....	173
8.2	Calibración del modelo hidráulico	177
9	CAPÍTULO Modelación de calidad del agua: HEC-RAS	186
9.1	Datos para el modelo.....	186
9.1.1	Datos geométricos e hidrodinámicos	186
9.1.2	Datos meteorológicos	186
9.1.3	Datos de calidad del agua	187
10	CAPÍTULO Modelación: componente calidad	190
10.1	Desarrollo del modelo de calidad del agua	190
10.2	Calibración del modelo calidad	193
11	CAPITULO Simulación de alternativas.....	204
11.1	Escenarios planteados	204
11.1.1	. Escenario de simulación 1	204
11.1.2	. Escenario de simulación 2	211
11.1.3	. Escenario de simulación 3.....	218
11.2	Análisis de los resultados en términos de calidad del agua (normatividad vigente)	

11.2.1	Acuerdo 043 del 2006 CAR (por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020)	226
11.2.2	Decreto 3930 de 2010 (Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones).....	227
11.2.3	Resolución 0631 de 2015 (por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones)	228
12	CAPITULO Conclusiones y recomendaciones	230
12.1	Conclusiones	230
12.2	Recomendaciones	235
	Bibliografía.....	236

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de rango sugeridos para las constantes y parámetros de velocidad de algas.....	57
Tabla 2. Parámetros para fuentes y sumideros para DBOC.....	61
Tabla 3. Parámetros para fuentes y sumidero para OD.	63
Tabla 4. Constantes de velocidad y parámetros de nitrógeno.....	67
Tabla 5. Parámetros para fuentes y sumideros de fósforo	70
Tabla 6. Marco legal considerado para modelos de calidad del agua.	70
Tabla 7. Relación de normatividad asociada a temas ambientales y de calidad del agua.	71
Tabla 8. Coordenadas geográficas municipio de Viotá	74
Tabla 9. Estaciones hidrometeorológicas en el área de estudio.....	78
Tabla 10. Correlación de las unidades geológicas que afloran en las cuencas del río Lindo, Quebradas Pilama y San Juana.	83
Tabla 11. Ubicación del tramo de la piscina municipal – San Antonio.....	84
Tabla 12. Secciones de aforo sobre el río Lindo y Q. Pilama	91
Tabla 13. Datos de campo para la sección 1-1	92
Tabla 14. Datos de campo para la sección 2-2	93
Tabla 15. Datos de campo para la sección 3-3	94
Tabla 16. Datos de campo para la sección 4-4	94
Tabla 17. Datos de campo para la sección 5-5	95
Tabla 18. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 1-1	96
Tabla 19. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 2-2	97
Tabla 20. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 3-3	98
Tabla 21. Sección transversal de la Quebrada Pilama – sección 4-4.....	99
Tabla 22. Sección transversal tramo Río Lindo 2 – sección 5-5.....	100
Tabla 23. Descarga No. 7 – sector Cogoyo	102
Tabla 24. Descarga No. 8 – Carrera 12, puente peatonal	102
Tabla 25. Descarga No. 10 – Sector matadero	103
Tabla 26. Descarga No. 11 – Vertimiento del Hospital	103
Tabla 27. Descarga No. 12 – Vertimiento piscinas y recreación Camoa	104
Tabla 28. Datos de correlación sonda 1 – agua destilada.....	106
Tabla 29. Datos de correlación sonda 1 – agua río Lindo	107

Tabla 30. Datos de correlación sonda 2 – agua destilada.....	108
Tabla 31. Datos de correlación sonda 2 – agua río Lindo	109
Tabla 32. Resultados del análisis de CDL- tramo 1-2-3.	112
Tabla 33. Resultados del análisis de CDL- tramo 4-5-6.	114
Tabla 34. Métodos aplicados en el laboratorio de ambiental de la Escuela.....	117
Tabla 35. Oxígeno disuelto obtenido en el laboratorio.	118
Tabla 36. Datos obtenidos de DQO, DBO ₅ y ml de muestra para las botellas DBO.	121
Tabla 37. Resultados del OD y DBO.....	124
Tabla 38. Cálculo pendiente media Q. San Juan	131
Tabla 39. Cálculo pendiente media Q. Pilama	134
Tabla 40. Análisis de la pendiente media de la cuenca del Río Lindo	136
Tabla 41. Condiciones Soil Conservation Service número de curva	138
Tabla 42. Distribución de usos y tipo de suelo en la cuenca del río Lindo.....	140
Tabla 43. Determinación de la condición hidrológica por uso de suelo	141
Tabla 44. Asignación de número de curva del SCS	142
Tabla 45. Cálculo de número de curva por cuenca	142
Tabla 46. Valores de entrada para estimación de tiempos de concentración.....	143
Tabla 47. Tiempo de Concentración cuenca Q. San Juan	143
Tabla 48. Tiempo de Concentración cuenca Q. Pilama	144
Tabla 49. Tiempo de Concentración cuenca del río Lindo	145
Tabla 50. Parámetros de las quebradas y del río Lindo	148
Tabla 51. Características de las estaciones limnimétricas	153
Tabla 52. Frecuencia de caudales mínimos del río Lindo 1.....	154
Tabla 53. Frecuencia de caudales mínimos de la Quebrada La Pilama.....	154
Tabla 54. Frecuencia de caudales mínimos de la Quebrada Sirena	155
Tabla 55. Caudales 7Q ₁₀	155
Tabla 56. Distribución espacial Municipio de Viotá	156
Tabla 57. Censos de población Viotá.....	156
Tabla 58. Tasas de Crecimiento lineal. Cabecera Municipio de Viotá (hab/año).....	158
Tabla 59. Tasas de crecimiento geométrico anual. Cabecera Municipio de Viotá.....	159
Tabla 60. Tasas de crecimiento logarítmico anual. Cabecera Municipio de Viotá.....	160
Tabla 61. Tasas de crecimiento Wappus anual. Cabecera Municipio de Viotá.....	161

Tabla 62. Tasas de crecimiento Wappus (Promedio Tasas) anual. Cabecera Municipio de Viotá	162
Tabla 63. Coeficientes de ajuste por Mínimos Cuadrados	164
Tabla 64. Resumen de métodos de proyección de población. Cabecera Municipio de Viotá	168
Tabla 65. Proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá. Años 2018 – 2044.	169
Tabla 66. Equipos utilizados en el levantamiento topobatimétrico.....	170
Tabla 67. Caudales y su respectiva sección transversal	176
Tabla 68. Secciones transversales para la calibración hidráulica.....	178
Tabla 69. Resultados de la modelación hidráulica tramo río Lindo 1.....	182
Tabla 70. Características de la estación Esc. Samper Madrid	186
Tabla 71. Parámetros de la estación Esc. Samper Madrid.....	187
Tabla 72. Cálculos para determinar coeficiente desoxigenación.....	188
Tabla 73. Coeficientes de reaireación.....	189
Tabla 74. Coeficientes de dispersión longitudinal	191
Tabla 75. Valores iniciales de los parámetros del modelo.....	192
Tabla 76. Punto de muestreo y su respectiva ubicación en el programa.....	193
Tabla 77. Resultados de la DBOC cambiando la longitud de la celda.....	194
Tabla 78. Resultados del OD cambiando la longitud de la celda.....	195
Tabla 79. Porcentaje de error de la calibración del oxígeno disuelto.....	195
Tabla 80. Porcentaje de error de la calibración de la DBOC	195
Tabla 81. Parámetros de calibración ajustado para la simulación de calidad del agua ..	196
Tabla 82. Tabla de resultados de la calibración de calidad	201
Tabla 83. Caudales 7Q ₁₀	204
Tabla 84. Caudales del primer escenario al programa HEC-RAS	204
Tabla 85. Resultados obtenidos del primer escenario.....	207
Tabla 86. Población proyectada y tasas de crecimiento quinquenales.....	211
Tabla 87. Datos de entrada y caudales ajustados para la simulación 2	211
Tabla 88. Caudales del segundo escenario al programa HEC-RAS.....	212
Tabla 89. Resultados obtenidos del segundo escenario	214
Tabla 90. Valores calculados para el factor de mayoración	219
Tabla 91. Valores empleados para el cálculo del caudal de diseño	219
Tabla 92. Caudales del tercer escenario al programa HEC-RAS	220

Tabla 93. Resultados del tercer escenario	222
Tabla 94. Aplicación del acuerdo 043/2006-CAR para los puntos de muestreo analizados en el laboratorio.....	227
Tabla 95. Aplicación de la resolución 0631/2015 para las descargas analizadas en el laboratorio.....	229

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.....	27
Figura 2. Fenómeno de difusión advección. Fuente: elaboración propia.....	28
Figura 3. Fenómeno de difusión dentro de una sección de tubería advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.	28
Figura 4. Parámetros del modelo ADZ. Fuente: Botero, 2015.....	31
Figura 5. Curva de Demanda bioquímica de oxígeno. Fuente: Romero, J. (2009). Calidad del agua.....	39
Figura 6. Fenómeno de autodepuración. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos. 40	
Figura 7. Zonas de influencia de un vertido. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos	41
Figura 8. Comportamiento del oxígeno disuelto en una corriente de agua. Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico	43
Figura 9. Esquema de una corriente de agua con las características de una descarga. Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico	46
Figura 10. Representación de los términos del balance de energía. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.....	51
Figura 11. División por defecto en las secciones de HEC-RAS. Fuente: Manual de HEC-RAS	53
Figura 12. Subdivisión de la función de transporte K en las diferentes partes de la sección. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.	54
Figura 13. Ejemplo gráfico de esta alternativa de cálculo. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.	54
Figura 14. Metodología aplicada. Fuente: elaboración propia.....	73
Figura 15. Localización del municipio de Viotá – Cundinamarca. Fuente: IGAC	75
Figura 16. Localización general del área de estudio. Fuente: IGAC.....	76
Figura 17. Localización detallada del río Lindo. Fuente: IGAC.....	77
Figura 18. Mapa de estaciones Red CAR y Red IDEAM – municipio de Viotá. Fuente: Elaboración propia, IDEAM, CAR	79

Figura 19. Precipitación media mensual multianual cuenca Río Lindo. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S.....	80
Figura 20. Histograma de temperatura media mensual multianual. Fuente: UT AVR-CAR 2015, a partir de información del IDEAM (2013) e IGAC (2010).....	81
Figura 21. Histograma de humedad relativa media mensual multianual. Fuente: UT AVR-CAR 2015, a partir de información del IDEAM (2013) e IGAC (2010)	81
Figura 22. Brillo solar estación Esc. Samper Madrid. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S... 82	
Figura 23. Ubicación general del tramo de evaluación. Fuente: IGAC, elaboración propia.	85
Figura 24. Ubicación en planta de las secciones de aforo. Fuente: elaboración propia... 91	
Figura 25. Ubicación de descargas principales sobre río Lindo – Viotá. Fuente: elaboración propia	101
Figura 26. Ubicación puntos de control de Conductividad. Fuente: elaboración propia.. 105	
Figura 27. Curva de calibración sonda 1 -agua destilada. Fuente: elaboración propia... 107	
Figura 28. Curva de calibración sonda 1 – agua río Lindo. Fuente: elaboración propia . 108	
Figura 29. Curva de calibración sonda 1 - agua destilada. Fuente: elaboración propia.. 109	
Figura 30. Curva de calibración sonda 2 – agua río Lindo. Fuente: elaboración propia . 110	
Figura 31. Normalización de valores del trazador 2-3. Fuente: elaboración propia	111
Figura 32. Normalización de valores del trazador 5-6. Fuente: elaboración propia	111
Figura 33. Parámetros del tramo 1-2-3 CDL. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 34. Parámetros del tramo 4-5-6 CDL. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 35. Estaciones de muestreo de la red monitoreo. Fuente: elaboración propia 116	
Figura 36. Distribución espacial de las muestras para los ensayos de laboratorio. Fuente: IGAC, elaboración propia.....	119
Figura 37. Resultados del OD y DBOC. Fuente: elaboración propia	125
Figura 38. Subcuencas Río Lindo. Fuente: IGAC	127
Figura 39. Áreas de las subcuencas Río Lindo. Fuente: IGAC	129
Figura 40. Distribución espacial de pendientes en la cuenca del Río Lindo. Fuente: IGAC	130
Figura 41. Pendiente cauce media y compensada del Quebrada San Juan.	131
Figura 42. Pendiente media de la cuenca de la Q. San Juan. Fuente: CAR	133
Figura 43. Pendiente media y compensada del cauce Q. La Pilama. Fuente: CAR	133
Figura 44. Pendiente media de la cuenca de la Q. La Pilama. Fuente: CAR.....	135

Figura 45. Pendiente media y compensada del cauce Río Lindo. Fuente: CAR.....	136
Figura 46. Pendiente media de la cuenca del Río Lindo. Fuente: CAR.....	138
Figura 47. Distribución de usos del suelo y tratamiento del suelo. Fuente: IGAC.....	139
Figura 48. Tiempo de Concentración de la cuenca Q. San Juan. Fuente: CAR	144
Figura 49. Tiempo de Concentración de la cuenca Q. Pilama. Fuente: CAR	145
Figura 50. Tiempo de Concentración de la cuenca Río Lindo. Fuente: CAR.....	146
Figura 51. Distribución unitaria de Lluvia tipo Huff. Fuente: CAR.....	147
Figura 52. Precipitación proyectada cuenca Río Lindo. Fuente: CAR	147
Figura 53. Parámetros del modelo hidrológico. Fuente: CAR.....	148
Figura 54. Modelo Escorrentía por el número de Curva del SCS. Fuente: CAR.....	149
Figura 55. Datos de entrada para las cuencas. Fuente: CAR	149
Figura 56. Datos de entrada para modelo de lluvia. Fuente: CAR	150
Figura 57. Hidrogramas de salida de las cuencas del modelo de escorrentía. Fuente: CAR	150
Figura 58. Hidrograma Nodo 1. Fuente: CAR	151
Figura 59. Hidrograma Nodo 2. Fuente: CAR	151
Figura 60. Hidrograma Nodo 3. Fuente: CAR	152
Figura 61. Hidrograma N3-N2-N1. Fuente: CAR.....	152
Figura 62. Ubicación de las estaciones Viotá y Pte. Sáenz Fuente: IGAC, elaboración propia	153
Figura 63. Censos de población Viotá – Cund., Cabecera Municipal. Fuente: DANE 2018. Fuente: elaboración propia	157
Figura 64. Proyección de población por crecimiento lineal – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	158
Figura 65. Proyección de población por crecimiento geométrico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	159
Figura 66. Proyección de población por crecimiento logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	161
Figura 67. Proyección de población por crecimiento Wappus –Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	162
Figura 68. Proyección de población por crecimiento Wappus (Promedio Tasas) – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia.....	163

Figura 69. Proyección de población por M.C. caso lineal – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	164
Figura 70. Proyección de población por M.C. caso logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	165
Figura 71. Proyección de población por M.C. caso Exponencial – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	165
Figura 72. Proyección de población por M.C. caso Potencial – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	166
Figura 73. Resumen de métodos de proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia	166
Figura 74. Estadístico de Chauvenet para valores de n datos. Fuente: elaboración propia	167
Figura 75. Curva de proyección población Cabecera Viotá. Fuente: elaboración propia	169
Figura 76. Redes irregulares de triángulos (TIN). Fuente: CAR, ArcMap 10.5	172
Figura 77. TIN recortado utilizado para la modelación. Fuente: CAR, ArcMap 10.5.....	172
Figura 78. Secciones transversales, banca y eje del río. Fuente: ArcMap 10.5.....	174
Figura 79. Geometría del río Lindo y quebrada Pilama. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	175
Figura 80. Condiciones de contorno. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	175
Figura 81. Caudales ingresados. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	177
Figura 82. Quebrada Pilama - Sección K0+021.22. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	178
Figura 83. Río Lindo 1 - Sección K0+020.53. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	179
Figura 84. Río Lindo 2 - Sección K1+350.29. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	179
Figura 85. Perfil del tramo Río Lindo 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	181
Figura 86. Gráfica Ln r vs tiempo. Fuente: elaboración propia	189
Figura 87. Condiciones de contorno. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	190
Figura 88. Estación meteorológica ESC. Samper Madrid. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	191
Figura 89. Simulación del modelo de calidad del agua. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	192
Figura 90. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 1, punto de muestreo 1 entre las secciones transversales K0+576.48 al K0+475.0 Fuente: HEC-RAS 5.0.6	197
Figura 91. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 1, punto de muestreo 2 entre las secciones transversales K0+165 al K0+015.83 Fuente: HEC-RAS 5.0.6	198
Figura 92. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 2, punto de muestreo 3 entre las secciones transversales K3+134.83 al K3+030 Fuente: HEC-RAS 5.0.6	199

Figura 93. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 2, punto de muestreo 4 entre las secciones transversales K3+030 al K2+925.07 Fuente: HEC-RAS 5.0.6	200
Figura 94. Calibración del OD del modelo de calidad del agua del Río Lindo en planta. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	202
Figura 95. Calibración de la DBOC del modelo de calidad del agua del Río Lindo en planta. Fuente: HEC-RAS 5.0.6.....	203
Figura 96. Caudales del primer escenario. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	205
Figura 97. Oxígeno disuelto del escenario 1. Fuente: Elaboración propia.....	206
Figura 98. DBOC del escenario 1. Fuente: Elaboración propia	207
Figura 99. Comportamiento del OD del escenario 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	209
Figura 100. Comportamiento de la DBOC del escenario 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	210
Figura 101. Caudales ingresados para el segundo escenario. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	212
Figura 102. OD del escenario 2. Fuente: Elaboración propia	213
Figura 103. DBOC del escenario 2. Fuente: Elaboración propia	213
Figura 104. Comportamiento del OD del escenario 2. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	216
Figura 105. Comportamiento de la DBOC del escenario 2. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	217
Figura 106. OD del escenario 3. Fuente: Elaboración propia	221
Figura 107. DBOC del escenario 3. Fuente: Elaboración propia	222
Figura 108. Comportamiento del OD del escenario 3. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	224
Figura 109. Comportamiento de la DBOC del escenario 3. Fuente: HEC-RAS 5.0.6	225

Índice de fotografías

Fotografía 1. Punto de Control – Vertedero zona de piscina Fuente: elaboración propia	86
Fotografía 2. Sección cauce Río Lindó aguas abajo de la zona de la piscina. Fuente: elaboración propia	86
Fotografía 3. Confluencia del Río Lindo (Izq.) y la quebrada Pilama (Der.). Fuente: elaboración propia	87
Fotografía 4. Panorámica del cauce en la zona de la PTAR proyectada. Fuente: elaboración propia	88
Fotografía 5. Calibración de las sondas en el laboratorio. Fuente: elaboración propia.....	89
Fotografía 6. Primera ubicación muestreo y aforo. Fuente: elaboración propia.....	90
Fotografía 7. Ubicación de conductividad y mezcla. Fuente: elaboración propia.....	90
Fotografía 8. Aforo en la sección 1-1. Fuente: elaboración propia	92
Fotografía 9. Ubicación de la sonda en el río Lindo. Fuente: elaboración propia	105
Fotografía 10. Toma de muestra de una descarga de A.R. Fuente: elaboración propia.	117
Fotografía 11. Muestras tomadas en campo para el oxígeno disuelto. Fuente: elaboración propia	118
Fotografía 12. Titulación del oxígeno disuelto. Fuente: elaboración propia	120
Fotografía 13. Las botellas para el método titulométrico. Fuente: elaboración propia	121
Fotografía 14. Botellas de Winkler para incubación. Fuente: elaboración propia	122
Fotografía 15. Titulación del O.D. de cinco días. Fuente: elaboración propia.....	123

1 CAPÍTULO Introducción

En la historia, el primer modelo matemático de calidad del agua es el modelo desarrollado por Streeter y Phelps en 1925, con el que se posibilita estudiar el balance de oxígeno en el río Ohio. Aunque este modelo solo buscaba aplicar los conceptos cinéticos relativos a la oxidación de la materia orgánica creada por el mismo Phelps, en la actualidad se sigue aplicando. A partir de dichos estudios iniciales, se han venido desarrollando, por diferentes grupos de investigadores, teorías y modelos mucho más complejos, que buscan reproducir de la mejor forma posible los intrincados procesos que tiene lugar en cuerpos de agua cuando estos reciben vertidos de nutrientes de diversas tipologías.

Estos modelos de calidad de agua son un tipo de herramienta que juegan un rol importante para ayudar a entender y cuantificar la relación causa-efecto asociado en los procesos físicos, químicos y biológicos en los cuerpos de agua.

En otras palabras, han sido utilizados para evaluar distintas alternativas de gestión para mejorar la calidad del agua, para contribuir en el proceso de toma de decisiones y fortalecer el desarrollo sostenible; una vez calibrado el modelo se usa para entender las variaciones de la calidad por medio de simulaciones en diferentes escenarios en condiciones actuales y futuras, por ejemplo, la descarga de un contaminante, cambios en el uso de la tierra y los efectos del cambio climático.

Como lo menciona Jorge Castillo, “hoy en día, existen números programas computacionales generalizados que permiten configurar modelos matemáticos de calidad de agua con relativa facilidad. Aunque en estricto rigor un modelo es la representación de un sistema real, es decir, un sistema caracterizado por las variables que definen la configuración espacial, el comportamiento hidráulico y la cinética de las reacciones entre los parámetros de calidad, a veces se acostumbra a designar con el nombre de modelo a los programas de computación generalizado”.

El presente trabajo de grado busca consolidar el conocimiento de la autora en esta área de estudio, mediante la construcción, calibración y ejecución de un modelo hidráulico y básico de la calidad del agua, haciendo uso para la modelación de calidad de agua con la ayuda del programa HEC-RAS, en el tramo del río Lindo se localiza en el departamento de Cundinamarca, y que recibe las descargas de residuos líquidos del municipio de Viotá que

se encuentra al sur occidente de Bogotá, D.C. a 86 km de esta, en la provincia de Tequendama.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar un análisis de calidad del agua en el río Lindo mediante la construcción de un modelo de calidad, utilizando el programa HEC-RAS QUALITY aplicado a los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno última carbonácea (DBOC) y Oxígeno disuelto (OD).

1.1.2 Objetivos específicos

Obtener una topografía y batimetría detallada del río Lindo y sus afluentes en la zona de estudio.

Realizar la toma de muestras, monitoreo de la evolución de trazadores y aforos desde 500 metros aguas arriba del municipio Viotá hasta la desembocadura en el río Calandaima.

Determinar las características físicas y químicas del agua del río Lindo en el laboratorio.

Construir el modelo hidráulico y de calidad del agua del tramo en estudio, haciendo uso del programa HEC-RAS, para simular la interacción de los diferentes parámetros seleccionados.

Calibrar el modelo matemático.

Realizar la evaluación de la calidad del agua del tramo en estudio para cada modelación para diferentes escenarios de vertimientos actuales y futuros de AR sobre el tramo de río en estudio.

Comparar los resultados obtenidos de cada una de las modelaciones contra los valores definidos de calidad del agua en las normas vigentes.

2 CAPÍTULO Conceptos básicos y marco teórico

La contaminación del medio acuático es generalmente provocada por el ser humano que la vuelve impropia o peligrosa para el consumo de los seres vivos, este proceso de deterioro del cuerpo de agua es debido a la introducción directa o indirectamente de sustancias que luego resultan en problemas como: afectación en la salud, daños en los organismos vivos, impedimento de actividades acuáticas como natación, pesca, buceo, etc., e interferencia sobre actividades económicas como el riego, el abastecimiento del agua para la industria.

2.1 Aspectos básicos sobre la contaminación del agua

A continuación, se definen varios conceptos fundamentales sobre el problema de la contaminación de las fuentes hídricas.

2.1.1 Aguas residuales

“Agua que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria”. (Tratamiento de aguas residuales, título E, RAS 2000)

“Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. Las aguas residuales incluyen las aguas usadas, domesticas, urbanas y los residuos líquidos industriales o mineros eliminados, o las aguas que se mezclaron con las anteriores (aguas pluviales o naturales). Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo¹.

2.1.2 Aguas residuales domesticas (ARD)

Aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios generados principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

¹ Aguas residuales. Wikipedia. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Aguas_residuales del 21 de noviembre de 2019.

2.1.3 Aguas residuales municipales

“Agua residual de origen doméstico, comercial e institucional que contienen desechos humanos”. (Tratamiento de aguas residuales, título E, RAS 2000)

2.1.4 Aguas crudas

“Agua procedente de usos domésticos, comerciales, agropecuarios y de procesos industriales, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso”. (Tratamiento de aguas residuales, título E, RAS 2000)

2.1.5 Aguas negras

Se denominan aguas negras a las aguas residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógenos y coliformes fecales².

2.2 Mecanismos de transporte³

En el estudio de la calidad del agua, uno de los temas más importantes es entender el comportamiento de un contaminante o una sustancia química que entra en un medio acuático; este fenómeno inmerso dentro de un fenómeno de transporte del agua y de las sustancias contaminantes, como uno de los principales factores que motiva los cambios que se producen en un sistema o ambiente acuático, el cual por su naturaleza y los diversos procesos físicos, químicos y biológicos que en él tienen lugar, busca restaurar el equilibrio cuando en partes del sistema se dan condiciones físicas diferentes. Es entonces fácil deducir que este proceso natural, movido por las afectaciones introducidas a él por acciones antrópicas, involucra una variedad de reacciones químicas y bioquímicas que tiene lugar en un medio fluido en constante movimiento dentro de un medio físico, las cuales se buscan representar por un conjunto de subprocesos que interactúan y dan como resultado una evolución

² Aguas residuales. Cuido el agua. Recuperado de <http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguaresiduales/aguasresiduales.html> del 21 de noviembre de 2019.

³ Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín. Recuperado de <https://es.slideshare.net/vladyvostok/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnostico> del 16 de octubre de 2019.

en el espacio y en el tiempo de la concentración de diferentes sustancias contenidas en el medio líquido.

Con el fin de analizar el comportamiento de los contaminantes, los investigadores han propuesto diferentes expresiones, con bases teóricas y apoyadas en resultados empíricos, para poder explicar la concentración de las sustancias monitoreadas que se ven afectadas por estos fenómenos. A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.2.1 Advección

Se entiende por advección al mecanismo mediante el cual una sustancia o contaminante pasa, se mueve o se transporta de un sitio a otro en un cuerpo de agua debido a la fuerza o al impulso del caudal. Si solo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada por el contaminante sería constante.

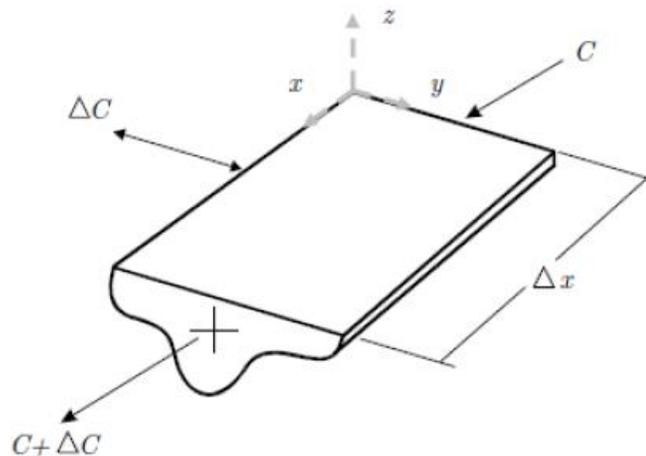


Figura 1. Proceso de advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.

2.2.2 Difusión

La difusión se refiere al traslado de masa de un lugar a otro debido al movimiento al azar en el tiempo que tienen las moléculas de agua. La advección transporta la sustancia química de un lugar a otro sin cambiarle su identidad mientras que en la

difusión la masa se va diluyendo en el tiempo con un movimiento neto despreciable de su centro de masa. En ambos casos, la sustancia al moverse cambia su concentración, pero no su composición química.

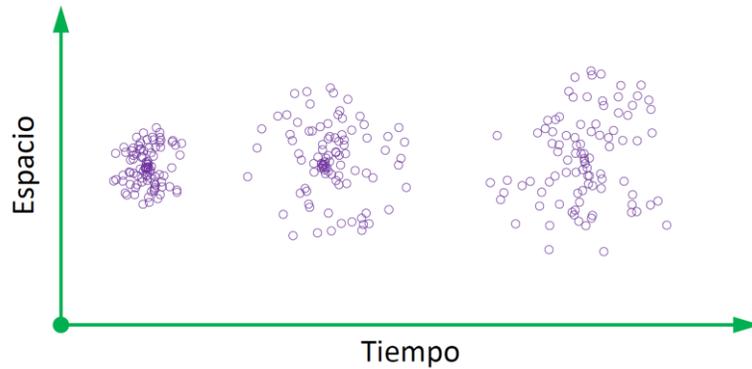


Figura 2. Fenómeno de difusión advección. Fuente: elaboración propia

2.2.3 Dispersión

Este transporte se considera cuando un contaminante se esparce en el agua, este fenómeno se debe al movimiento propio que poseen las moléculas (movimiento Browniano) o una acción de mezcla como la ocasionada por el viento. Pero también, el contaminante se puede esparcir o dispersar porque existan diferencias de velocidad entre dos sitios en el agua. Cuando se presentan dichas diferencias de velocidad la sustancia se mueve en el espacio (eje x) y cambia su concentración, pero no su composición química.

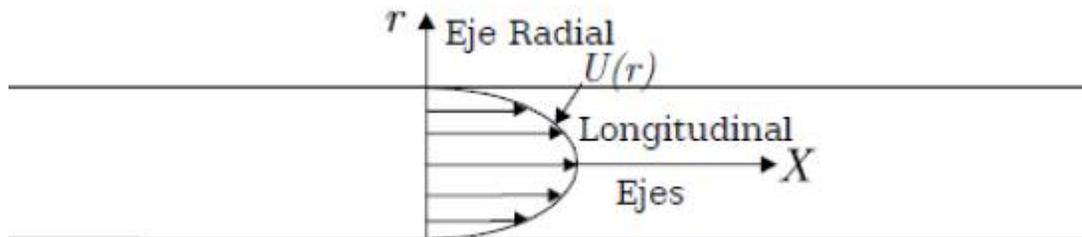


Figura 3. Fenómeno de difusión dentro de una sección de tubería advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.

2.3 Ensayos de trazadores⁴

Los ensayos de trazadores son ensayos de campo, en los cuales se mide la concentración de un soluto vertido en un cauce aguas arriba. Las mediciones se realizan en dos puntos del cauce alejados del lugar de inyección del soluto, y deben ser puntos alejados entre sí de tal manera que el soluto haya experimentado los procesos de advección una distancia tal que se puedan apreciar cambios significativos en su concentración y su posición.

Con los resultados de la medición, es posible (Vargas, 2009):

- Determinar el caudal del cauce.
- Determinar el coeficiente de dispersión longitudinal en cauces.
- Determinar tiempos de viaje en cuerpos de agua.
- Determinar coeficientes de dispersión y estudiar patrones de mezcla.
- Estudios de balance de masa.
- Medición de tiempos de concentración en cuencas hidrográficas.

El soluto, elemento indispensable en un ensayo de trazadores, es una sustancia soluble en agua cuyas características a medir deben tener baja interferencia con la concentración base o de fondo, debe ser una sustancia estable y conservativa. Estas características para medir dependen del trazador utilizado, rodamina B (base ácida), rodamina WT (etileno, glicol), cloruro de sodio (sal), litio, bromo, aminoácido E; en los cuales los solutos más comunes se encuentra la sal y la rodamina, se les mide la conductividad y la fluorescencia respectivamente.

Los solutos, al ser sustancias conservativas permiten estimar el caudal de la corriente, con base en la ley de conservación de masa mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{M}{\int C dt}$$

⁴ Alvarado, D. (2011, julio). Aplicación de un modelo de transporte de solutos en el análisis de la hidrodinámica y el transporte de las concentraciones contaminantes en un hidrosistema urbano en Bogotá (tesis de maestría). Maestría en ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá

Donde: M = masa inyectada aguas arriba (M)

Q = caudal (L^3T^{-1})

C = concentración medida aguas abajo (ML^{-3})

Para ser efectivo un trazador debe ser:

- Soluble al agua
- Detectable a bajas concentraciones con instrumentos de campo
- Tener baja interferencia con la concentración base o de fondo
- No ser nocivo para la salud o la ecología en bajas concentraciones
- No ser costoso
- Ser razonablemente estable o conservativo

2.3.1 Efectividad de ensayos con trazadores⁵

Un ensayo de trazadores se considera válido si el estado de ganancia estable (SSG) se encuentra en un rango de 0.95 a 1.05 (Camacho & Cantor, 2006). El estado de ganancia estable es la relación de la masa de trazador medido entre dos puntos de medición, y este dado por la siguiente ecuación.

$$SSG = \frac{\int C_2 dt}{\int C_1 dt}$$

Estos ensayos de trazadores generan una excelente fuente de información para la calibración de los modelos hidráulicos y transporte en el agua.

2.4 Modelos de transporte de solutos

Los modelos de transporte de solutos representan los procesos de transporte por advección y dispersión en una corriente. Una correcta calibración de un modelo de transporte de solutos permite representar correctamente el tiempo de arribo y el tiempo medio de viaje, parámetros importantes en aplicaciones de la modelación de la calidad del agua (Camacho L., 2006)

⁵ Camacho, L. (2020, julio). Procesos y modelos de transporte de solutos y experimentos con trazadores. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Universidad de los andes.

2.4.1 Modelo de la zona muerta agregada – ADZ

El modelo ADZ define que todas las zonas muertas para un cuerpo de agua logran explicar una alta dispersión observada, el modelo simplifica que todas las zonas muertas se concentran en una única, que se considera equivalente con un volumen definido y un tiempo de residencia asociado (Beer, et al., 1983), mientras que la advección en el sistema el modelo lo asume mediante un coeficiente de retraso.

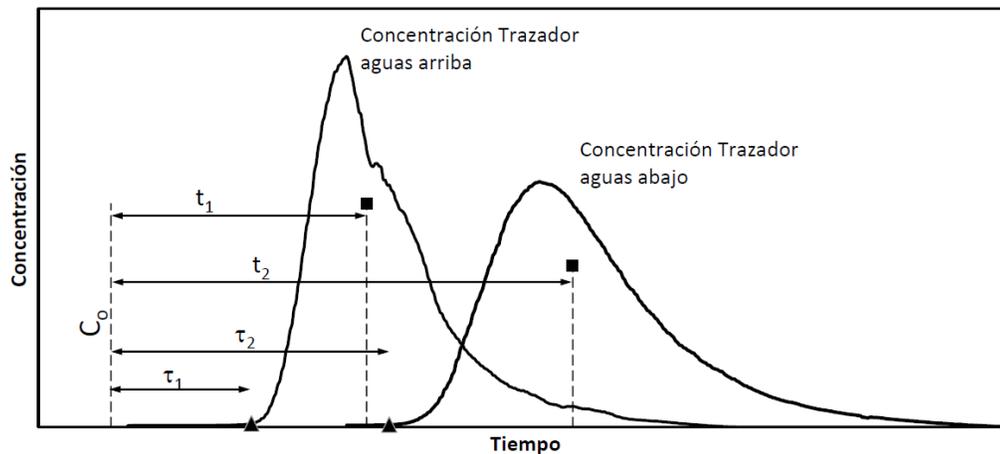


Figura 4. Parámetros del modelo ADZ. Fuente: Botero, 2015

Para simplificación se asumen dos puntos de control, pero pueden ser más puntos hacia aguas abajo, de tal forma que la aplicabilidad entre tramos es la misma para los dos primeros puntos.

Se definen τ_1 y τ_2 como el retraso advectivo de un soluto para cada uno de los puntos de control respectivamente, su diferencia representa el tiempo de arribo desde el punto 1 al punto 2 del soluto.

Se definen t_1 y t_2 , como los tiempos medios de llegada para un volumen único que viaja desde el punto 1 al punto 2, donde su diferencia es el tiempo medio de viaje de este volumen.

Con estos parámetros el modelo pretende representar adecuadamente el comportamiento del trazador en función del tiempo. Para que los modelos sean adecuadamente representados es necesario conocer cuál es la advección y dispersión longitudinal, de tal forma que un cuerpo de agua puede tener estos

fenómenos de transporte y la influencia de ellos depende en gran medida de las condiciones hidráulicas e hídricas del sistema.

Para el caso de una advección pura, donde el soluto se transporta sin sufrir modificación alguna en su concentración, es decir sin una dilución aparente, el tiempo de llegada se corresponde con el tiempo del arribo por lo que la fracción dispersa debe ser cero, (Botero, 2015), entendiéndose la fracción dispersa (DF) como el porcentaje de tiempo que tiene el cambio de la concentración, de tal manera que se define DF como

$$DF = \frac{\bar{t} - \tau}{\bar{t}} \quad (\text{ecu. 1})$$

Para el caso de una dispersión pura, en donde existe una alta dilución y en consecuencia el tiempo de arribo es nulo (no existe), la fracción dispersa es igual a uno, el fenómeno se traduce como si la dispersión fuera instantánea y no hubiera forma de identificar el trazador hacia aguas abajo.

Dado que la geometría del tramo es conocida, como son las secciones transversales, las distancias entre los puntos de control, inclusive los aforos de caudal en las secciones de control, etc., al conocer el tiempo medio de “viaje” del trazador entre dos puntos de control, se puede establecer de manera certera la velocidad media entre ellos. Es así como con el tiempo medio de viaje y la longitud entre puntos de control se puede calcular la velocidad media (Camacho, 2000).

$$\bar{V} = \frac{L}{\bar{t}} \quad (\text{ecu. 2})$$

De igual manera, conociendo el tiempo de arribo podemos conocer la velocidad máxima del viaje del trazador:

$$\bar{V}_{\text{máx}} = \frac{L}{\tau} \quad (\text{ecu. 3})$$

Estas velocidades son de gran utilidad, dado que, a partir de estos valores medios, se pueden realizar estimativos para las calibraciones de valores de rugosidad como por ejemplo de Manning en modelos hidráulicos, para el tramo en cuestión.

La curva de concentración tiene la característica que el área bajo esta curva multiplicada por la cantidad de soluto introducido representa el caudal asociado, de tal forma que se puede contrastar con las mediciones de campo y para realizar este cálculo se tomará el cálculo discreto por trapecios:

$$\frac{Q}{C_o} = Area\ Curva = \frac{1}{2} \sum [C(t_{i-1}) + C(t_i)] \Delta t_i \quad (ecu. 4)$$

Siendo C_o la cantidad de soluto introducido, Q el caudal asociado, $C(t_i)$ Valor de la concentración en el tiempo t_i .

Para la determinación del tiempo medio del viaje a partir de la curva de concentración, se calculará el centroide o primer momento del área bajo la curva de concentración, utilizando el cálculo de forma discreta así:

$$\bar{t} = \frac{\sum \left(A_i \frac{1}{2} (t_{i-1} + t_i) \right)}{\sum A_i} \quad (ecu. 5)$$

Siendo $A_i = \frac{1}{2} (C(t_{i-1}) + C(t_i)) \Delta t_i$

Para determinar el coeficiente de dispersión longitudinal, se realiza mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{\bar{V}^2}{2(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)} [\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2]$$

Donde los subíndices 1 y 2 corresponden a las respectivas curvas en los puntos de control, la velocidad es la definida por la ecuación 2, el término $\sigma_{t_i}^2$ corresponde a la varianza de la respectiva curva y se define como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum \left(A_i \left[\frac{1}{2} (t_{i-1} + t_i) \right]^2 \right)}{\sum A_i} - \bar{t}^2$$

Para la determinación del tiempo de arribo, se establece un valor del 1% de la concentración pico para identificar la hora de llegada de este valor de su respectiva curva.

2.5 Modelos de calidad del agua

Hoy en día, existe gran variedad de modelos de calidad del agua con el fin de poder estudiar y entender el comportamiento de un contaminante o grupo a lo largo de una corriente de agua. Generalmente la selección de estos modelos a implementar depende de la disponibilidad de la información, el propósito del estudio de la modelación y del proceso de transporte (advección, dispersión) y reacción (transformación de los determinantes de calidad del agua).

2.5.1 Utilidad de los modelos de calidad del agua

Una de las grandes preocupaciones en la actualidad es la contaminación de nuestras fuentes de agua más importantes como los ríos, los océanos, los lagos y los embalses, esto se debe que día a día van incrementando las descargas de efluentes contaminantes y esto ha llevado el deterioro de la calidad de las aguas; además, sin agua de buena calidad es imposible garantizar el bienestar del medio ambiente, de la especie humana, de los animales y de las plantas.

Con respecto a esta realidad de la contaminación, una de las metodologías de control de la calidad del recurso hídrico es la aplicación de herramientas computacionales como modelos de calidad del agua que ayudan de una cierta manera predecir el comportamiento de los cuerpos de agua sometida a descargas contaminantes.

“Los modelos de calidad de agua nos permite predecir el contenido futuro de varios contaminantes o parámetros de la calidad del agua, esto ayudara a tomar decisiones más acertadas en torno al manejo del recurso hídrico”. (Riecken, 1995)

Estos modelos matemáticos una vez contruidos, calibrados y validados pueden ser un instrumento de mayor importancia para evaluar probabilidades de ocurrencia de eventos críticos de contaminación, también para predecir la evolución de la calidad del agua bajo diferentes escenarios de desarrollo y control, e igualmente para la evaluación del impacto de las decisiones del manejo de una cuenca.

Otra utilidad es que sirven de herramientas de planificación para definir objetivos de calidad ambiental permitiendo que estos modelos evalúen el resultado de varias

políticas de manejo y control y así seleccionar la más óptima, ayudando a mejorar costos y beneficios asociados a la implementación de adecuadas políticas; también es útil para la distribución de costos ambientales afectados por diferentes descargas, cuando se presenta un problema de calidad de aguas naturales debido a varias descargas estos modelos permiten evaluar la importancia relativa de cada una, y de esta forma, tomar decisiones rápidas a la hora de ejecutar responsabilidades y manejo de recursos.

2.5.2 Tipos de estudios⁶

Básicamente con los modelos de calidad del agua se pueden realizar tres tipos de estudios: estudios descriptivos, elaborar predicciones y analizar problemas específicos.

2.5.2.1 Realizar estudios descriptivos

Estudios descriptivos se entiende la definición de un problema y no su solución. Pertenecen a esta categoría estudios de calidad del agua tales como:

Presentar la calidad del agua en detalle de un río. Aplicando un modelo se puede presentar a los entes interesados el estado actual de la calidad del agua y correlacionarla con variables tales como la época del año (verano, invierno), usos del suelo, etc.

Interpolar los datos observados. Un modelo de calidad del agua puede ser usado para reducir la frecuencia y puntos de muestreo en un programa de monitoreo rutinario de calidad del agua en un río.

Determinar la carga permisible de un contaminante. En este tipo de estudios se utiliza un modelo de calidad para determinar la capacidad que tiene un río de recibir cierta contaminación debida a la presencia de un contaminante. El cálculo de las cargas diarias máximas de contaminación (TMDI, siglas en ingles), que

⁶ Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín. Recuperado de <https://es.slideshare.net/vladyvostok/calidad-del-agua-evaluacin-y-diagnstico> del 16 de octubre de 2019.

por ley deben calcular las autoridades ambientales de los Estados Unidos para cada río, es utilizando un modelo de calidad del agua.

Determinar los procesos que están controlando la calidad del agua. También, estos modelos permiten establecer los procesos que están gobernando la calidad el agua. Por ejemplo, se puede determinar si es la descomposición de la materia orgánica, la reaireación o la demanda béntica, el proceso que está agotando el oxígeno disuelto en el agua. Asimismo, se puede establecer si las fuentes puntuales son más importantes o contaminantes que las distribuidas.

2.5.2.2 *Predicciones de calidad del agua*

Las predicciones de calidad del agua son utilizadas para conocer la variación de los contaminantes en el tiempo, es decir, cuando se necesita realizar simulaciones dinámicas. Como ejemplos de problemas de calidad del agua en los cuales se requiere hacer predicciones están:

Analizar la variación diaria de un contaminante. Está demostrado en las zonas tropicales, la variación diaria del oxígeno disuelto afecta altamente la calidad del agua. Durante el día debido a las altas temperaturas, la tasa de descomposición de materia orgánica es muy alta y hay casos en los cuales alcanza a agotar el oxígeno disuelto en la noche durante la respiración, se presentan condiciones anaeróbicas que pueden ocasionar la muerte de peces.

Determinar el efecto de la construcción de un sistema de recolección de aguas residuales.

2.5.2.3 *Analizar problemas específicos*

En esta categoría de estudios se pueden incluir aquellos en que se requiere conocer la respuesta a la pregunta ¿Qué pasa sí? Cuando un problema de calidad del agua pueda plantearse en términos de una pregunta, los programas de simulación son una herramienta muy útil para conocer la respuesta. Son ejemplos de estos casos:

Establecer objetivos y metas de calidad

Establecer normas de calidad del agua. De la misma manera como se establecen objetivos de calidad en un río, los modelos de calidad también permiten establecer estándares de calidad sobre los vertimientos de aguas residuales que recibe la corriente.

Otorgar permiso de vertimientos

Analizar el efecto en la calidad del agua de las medidas preventivas y remediadas adoptadas. En los planes o programas de saneamiento, la ubicación y el nivel de tratamiento de las plantas de aguas residuales planeadas se deben establecer con la ayuda de los modelos de calidad del agua.

2.6 Parámetros analizados

Los parámetros analizados para este estudio son el oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno para evaluar la calidad del agua del río Lindo, estos parámetros fueron elegidos porque el primero (OD), representa muy bien el estado de un cuerpo de agua y su capacidad para soportar a las diferentes especies que en él tienen su hábitat; el segundo (DBOC) es el parámetro más utilizado para representar la carga contaminante aportada por las AR. Además, estos parámetros están debidamente acotados dentro de la normatividad vigente.

2.6.1 Oxígeno disuelto (OD)⁷

El oxígeno disuelto es la concentración de oxígeno existente a determinadas condiciones de presión y temperatura, en una muestra líquida proveniente de líquidos residuales o de un cuerpo de agua. Su concentración en el líquido es función de la presión, la temperatura y la calidad del líquido y es expresada normalmente en mg/l.

La determinación de OD es muy importante en ingeniería ambiental por cuanto es el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular. La determinación de OD sirve como base para cuantificar DBO,

⁷ Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

aerobicidad de los procesos de tratamiento, tasas de aireación en los procesos de tratamiento aeróbico y grado de polución de los ríos. El OD se presenta en cantidades variables y bajas en el agua; su contenido depende de la concentración y estabilidad del material orgánico presente y es, por ello, un factor muy importante en la autopurificación de los ríos. Los valores de OD en aguas son bajos y disminuyen con la temperatura. El oxígeno libre en solución, especialmente cuando está acompañado de CO₂, es un agente de corrosión importante del hierro y el acero.

Las fuentes más importantes de OD son:

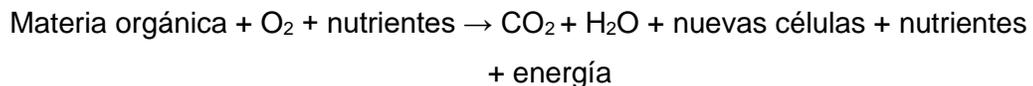
- Reaireación de la atmosfera
- Fotosíntesis de las plantas acuáticas
- OD aportado por los tributarios

Los consumidores más importantes de OD son:

- Oxidación de la materia orgánica
- Oxidación del material nitrogenado
- Oxígeno demandado o consumido por el material depositado en el fondo (SOD)
- Oxígeno utilizado por las plantas acuáticas para respiración

2.6.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)⁸

La oxidación microbial o mineralización de la materia orgánica es una de las principales reacciones que ocurren en los cuerpos naturales de agua y constituye una de las demandas de oxígeno, ejercida por los microorganismos heterotróficos, que hay que cuantificar.



⁸ Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días. Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días y a 20 °C.

En aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a cinco días representa en promedio un 65 a 70% del total de la materia orgánica oxidable. El ensayo supone la medida de la cantidad de oxígeno consumido por organismos vivos en la utilización de la materia orgánica presente en un residuo; por tanto, es necesario garantizar que durante todo el periodo del ensayo exista suficiente OD para ser utilizado por los organismos.

2.6.2.1 **Formulación de la DBO**

El análisis de una curva típica de demanda de oxígeno demuestra que la DBO obedece inicialmente, primera etapa, una reacción de primer orden o reacción unimolecular. Luego se ve afectada, segunda etapa, por el efecto del oxígeno requerido para nitrificación.

En una reacción de primer orden la tasa de oxidación es proporcional a la concentración de materia orgánica oxidable remanente, es decir, que la tasa de reacción está controlada solamente por la cantidad de alimento disponible.

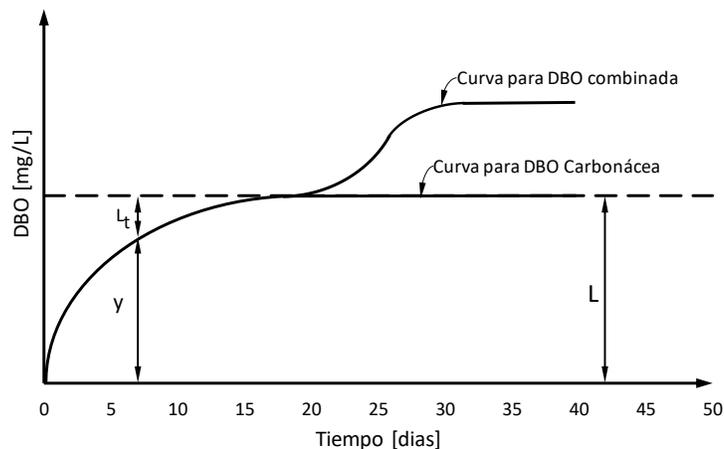


Figura 5. Curva de Demanda bioquímica de oxígeno. Fuente: Romero, J. (2009). Calidad del agua.

2.6.3 Comportamiento del OD y la DBO en un cuerpo de agua⁹

Antes de explicar el comportamiento del oxígeno disuelto y de la DBO en un cuerpo de agua es importante saber sobre el fenómeno de autodepuración, este consiste que un contaminante, en sus diversas formas ha llegado al sistema fluvial y se intervienen principios físicos (sedimentación, flotación y transporte), químicos y biológicos.

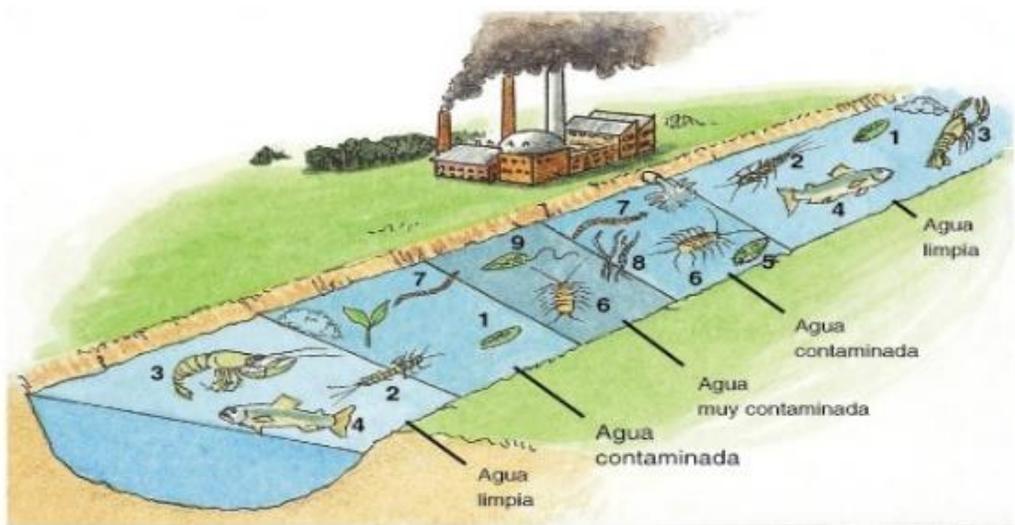


Figura 6. Fenómeno de autodepuración. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos

Se pueden establecer cuatro zonas de influencia de un vertido:

Zona de degradación

- zona inmediata a la incorporación de las aguas contaminadas al río.
- Es el área con mayores concentraciones de contaminantes.
- Desaparecen peces y algas; en el fango aparecen gusanos tubífidos, hongos y protozoos ciliados.
- Es posibles la existencia de peces que necesitan un poco oxígeno y se alimentan de materia orgánica.

⁹ Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín. Ediciones de la U.

Zona séptica o de descomposición activa

- Niveles mínimos de OD (puede llegar a desaparecer)
- No viven peces, y los organismos encargados de la descomposición orgánica trabajan activamente
- Pueden desprenderse gases (metano, hidrogeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros de mal olor)
- Pueden aparecer espumas en la superficie

Zona de recuperación

- Aumento del oxígeno, agua más clara.
- Reparación de la vida acuática macroscópica, disminución de hongos y aparición de algas.
- Aparecen peces resistentes
- Es posible encontrar nitratos, sulfatos, fosfatos y carbonatos

Zona de agua limpia

- Condiciones de corriente natural
- OD cercano a saturación
- Peces útiles para la pesca
- Pueden quedar bacterias patógenas resistentes y compuestos metálicos no alterados por los procesos bioquímicos existentes.

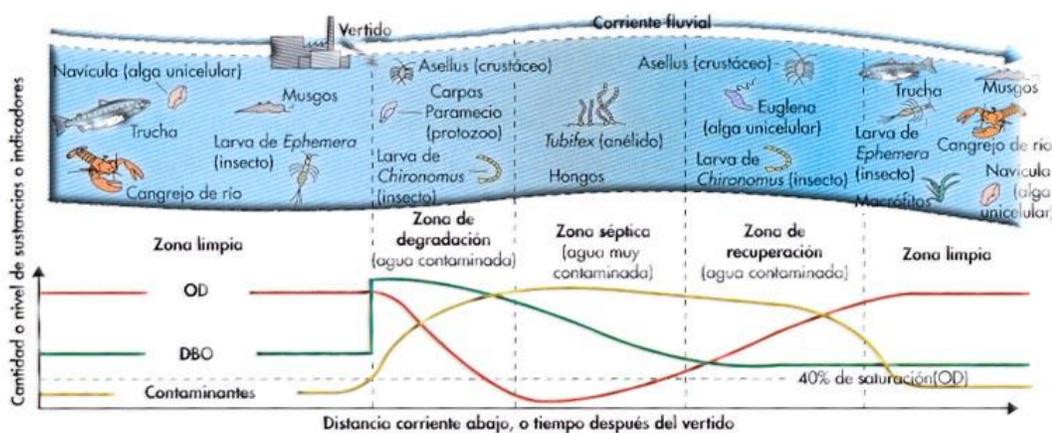


Figura 7. Zonas de influencia de un vertido. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos

Cuando una corriente de agua que no está contaminada recibe un vertimiento de aguas residuales, la concentración de OD aguas arriba de la descarga estará cerca del nivel de saturación. Una vez introducida la descarga, el contenido de materia orgánica se eleva y se presentan dos efectos: el contenido de sólidos genera turbiedad que, a su vez, impide el paso de la luz y, en consecuencia, se inhibe el crecimiento del fitoplancton. Simultáneamente, se puede presentar la sedimentación de los sólidos lo cual genera olores no deseables; la materia orgánica sirve de alimento para los microorganismos heterotróficos, proceso en el cual se consumen altas cantidades de oxígeno lo que origina, como resultado, su agotamiento. El fenómeno anterior puede ser explicado en la Figura 8.

A medida que el nivel de oxígeno desciende, el oxígeno contenido en la atmósfera entra a compensar el déficit que se presenta. En un principio la demanda de oxígeno en la columna de agua y en los sedimentos consume el aporte generado por esta reaeración. Como consecuencia, existe un punto en el cual se presenta un balance entre consumo y el aporte de oxígeno por aireación. Dicho punto se conoce que el “punto crítico” y a partir de él, reaeración es mayor que el consumo y el nivel de oxígeno empieza a incrementarse. En esta zona de recuperación, las características del agua son de mejor calidad presentándose vida biológica, menor turbiedad y poca materia orgánica.

La curva de oxígeno disuelto que se muestra en la Figura 8 es conocida comúnmente como “sag”. El comportamiento de esta curva depende de una variedad de factores entre los caudales están el caudal y la geometría de la corriente, la magnitud de la descarga y la temperatura.

Si por simplicidad en un cuerpo de agua se ignoran: el efecto de la dispersión, se considera que el fenómeno que está gobernando el comportamiento del oxígeno disuelto es la degradación de la materia orgánica carbonácea, no se tiene en cuenta la nitrificación ni el aporte por reaeración, no se incluye la fotosíntesis, y además, que la materia orgánica se desaparece por el efecto de la sedimentación y degradación microbiana, las siguientes ecuaciones representan los fenómenos considerados:

Reaeración: $k_a (C_s - C)$

Desoxigenación o degradación de la materia orgánica: $k_d * L$

Sedimentación: $k_s * L$

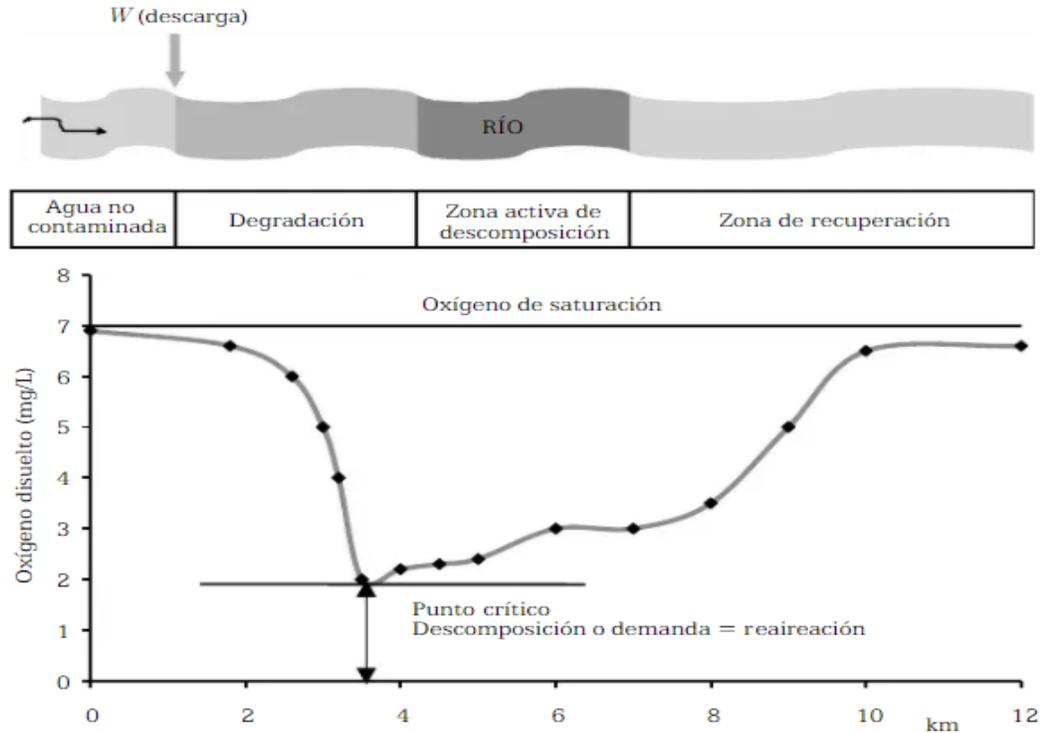


Figura 8. Comportamiento del oxígeno disuelto en una corriente de agua. Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico

Teniendo en cuenta los anteriores fenómenos, las siguientes ecuaciones es aplicada al caso del oxígeno disuelto puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} - k_d * L + k_a(C_s - C)$$

Donde:

K_d es la constante de desoxigenación en la corriente receptora

L es la concentración de DBO en la corriente

K_a es la constante de reaireación

C_s es el oxígeno de saturación

C es la concentración resultante de OD en el agua.

Si de manera análoga se aplica la anterior ecuación, al caso de lado, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -v \frac{\partial L}{\partial x} - k_R * L$$

Donde, K_R (igual a $k_d + k_s$) representa el efecto conjunto de la desaparición de la DBO por degradación de la materia orgánica y la sedimentación.

Las ecuaciones anteriores forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales; que, para solucionarlas, es necesario suponer que en el tramo de río en consideración se presentan condiciones de estado estable, es decir, se cumple que:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0 \text{ y } \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

El supuesto anterior hace que la ecuación se transforme en:

$$0 = -v \frac{\partial L}{\partial x} - k_R * L$$

La solución a la anterior ecuación es:

$$L_x = L_0 * e^{-k_R * \frac{x}{v}}$$

La ecuación anterior expresa la variación de la DBO última L_x , con respecto a la distancia aguas abajo (x), donde la DBO última es L_0 , la velocidad media del agua es v y la tasa de remoción de DBO por desoxigenación y sedimentación es igual a k_R , es decir, $k_d + k_s$.

Por sustitución y aplicando los mismos supuestos, la ecuación toma la siguiente forma:

$$0 = -v \frac{\partial C}{\partial x} - k_d * L_0 * e^{-k_R * \frac{x}{v}} + k_a(C_s - C)$$

Cuya solución es:

$$C_x = C_s - (C_s - C_o)e^{-k_a \frac{x}{v}} - \frac{k_d * L_o}{(k_a - k_R)} \left\{ e^{-k_R \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$$

En la ecuación anterior, C_o representa la concentración inicial de OD.

Es común expresar los niveles de oxígeno disuelto en términos del déficit de oxígeno (D). En estos casos $D = (C_s - C)$ y la ecuación puede reescribirse como:

$$v \frac{\partial D}{\partial x} = -k_d * L_o * e^{-k_R \frac{x}{v}} - k_a * D$$

Cuya solución es:

$$D_x = D_o e^{-k_a \frac{x}{v}} - \frac{k_d * L_o}{(k_a - k_R)} \left\{ e^{-k_R \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$$

Donde, D_o es el déficit inicial ($D_o = C_s - C_o$). la ecuación anterior mide el déficit de oxígeno D_x a una distancia aguas abajo (x), conociendo el déficit inicial (D_o), la velocidad promedio v, la DBO ultima (L_o) y las constantes de desoxigenación (k_d), remoción global de DBO (k_R) y la reaireación (k_a).

La ecuación en términos de oxígeno disuelto puede escribirse como:

$$C(x) = C_s - (C_s - C_o)e^{-k_a \frac{x}{v}} - \frac{k_d * L_o}{(k_a - k_R)} \left\{ e^{-k_R \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$$

A las ecuaciones anteriores se les conoce en la literatura como el modelo de Streeter and Phelps. Es importante recalcar una vez más que esas ecuaciones se obtienen suponiendo que los efectos de la fotosíntesis, respiración, demanda béntica y DBON no son significativos, además, tampoco se presentan cargas distribuidas.

El cálculo de las condiciones iniciales D_o y L_o se hace por medio de balances de masa cuando se conocen las condiciones de la corriente antes de la descarga y las características de la descarga según el siguiente esquema:

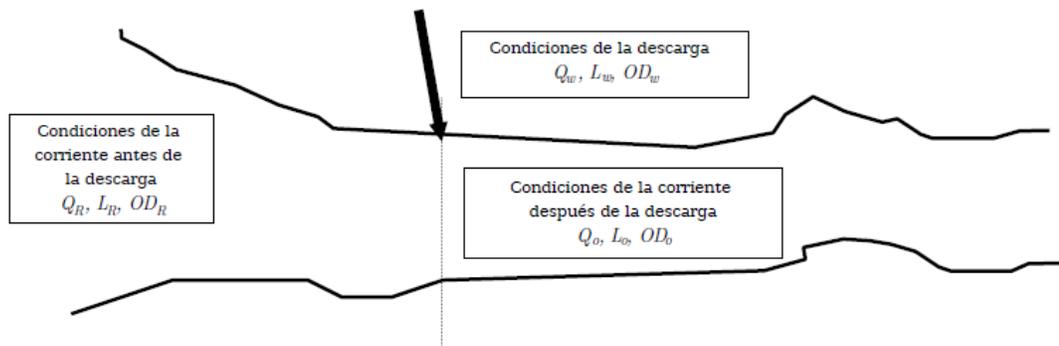


Figura 9. Esquema de una corriente de agua con las características de una descarga.

Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico

$$Q_o = Q_R + Q_w$$

$$D_o = C_s - OD_o$$

$$L_o = \frac{Q_R * L_R + Q_w * L_w}{Q_R + Q_w}$$

$$OD_o = \frac{Q_R * OD_R + Q_w * OD_w}{Q_R + Q_w}$$

Cuando se tienen en cuenta los efectos sobre el oxígeno disuelto y DBO en una corriente de la fotosíntesis, respiración, DBON, cargas distribuidas y demanda béntica, las ecuaciones anteriores se transforman:

Para el caso del oxígeno disuelto:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} - k_d L - k_N L_N + k_a (C_s - C) + F - R - SOD$$

Para el caso de la DBO:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial L}{\partial x} - k_R L - k_N L_N + L_D$$

Donde, L_D es la tasa de aporte de DBOU debido a las cargas o fuentes distribuidas (escorrentía). Los demás términos de la ecuación fueron definidos anteriormente.

Las nuevas ecuaciones para la demanda de oxígeno (L) y para el déficit de oxígeno (D) son:

$$L(x) = L_o e^{-k_R \frac{x}{v}} + L_N e^{-k_N \frac{x}{v}} + \frac{L_D}{k_R} [1 - e^{-k_R \frac{x}{v}}]$$

$D(x) = D_o e^{-k_a \frac{x}{v}}$	Déficit inicial
$+ \frac{k_d L_o}{k_a - k_R} \left\{ e^{-k_R \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	DBO carbonácea
$+ \frac{k_N L_N}{k_a - k_N} \left\{ e^{-k_N \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	DBON
$- \frac{k_d L_d}{(k_a - k_R) k_R} \left\{ e^{-k_R \frac{x}{v}} - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\} + \frac{k_d L_D}{k_a * k_R} \left\{ 1 - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	Cargas distribuidas
$+ \frac{R}{k_a} \left\{ 1 - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	Respiración
$- \frac{F}{k_a} \left\{ 1 - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	Fotosíntesis
$+ \frac{SOD}{k_a} \left\{ 1 - e^{-k_a \frac{x}{v}} \right\}$	Demanda béntica

Donde

K_d es la constante de desoxigenación en la corriente receptora

L_d son las fuentes distribuidas

L_o es DBO ultima

K_a es la constante de reaireación

K_R es la remoción global DBO

L_D es la tasa de aporte de DBOU debido a las cargas distribuidas

X es la distancia aguas abajo (m)

D_o es el déficit inicial

V es la velocidad promedio (m/s)

k_N es la tasa de reacción global de la nitrificación (d^{-1})

L_N es el nitrógeno oxidable total (DBON en mg/L)

SOD es la demanda béntica

R es la respiración

F es la fotosíntesis

2.7 Descripción del modelo computacional

El modelado computacional es el uso de computadoras para simular y estudiar el comportamiento de sistemas complejos mediante las matemáticas, la física y la informática. Un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema bajo estudio. La simulación se realiza ajustando cada una de estas variables, solas o combinadas, y observando cómo los cambios afectan los resultados.

Los resultados de las simulaciones de modelos ayudan a los investigadores a hacer predicciones acerca de qué pasará en el sistema real que se está estudiando en respuesta a condiciones cambiantes¹⁰.

2.7.1 Programa HEC-RAS

El software HEC-RAS es de dominio público desarrollado en el centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos.

Este programa está diseñado para realizar cálculos hidráulicos en una y dos dimensiones, régimen permanente y no permanente para una red completa de cauces abiertos, canales, ríos ya sean naturales o artificiales. Las nuevas versiones incorporan una serie de funciones dentro de las cuales se encuentra el módulo de

¹⁰ Modelo computacional. Instituto Nacional de Bioingeniería e imágenes biomédicas. (2016). Recuperado de <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/modelado-computacional> del 24 de octubre de 2019.

calidad del agua, la cual no ha sido actualizada para modelación en dos dimensiones.

HEC-RAS utiliza un enfoque unidimensional derivado de la ecuación de energía de fluidos desarrollada por Bernoulli, para calcular la altura de escurrimiento en flujos gradualmente variados. Se realiza un cálculo iterativo, comenzando por un punto de características conocidas y se avanza en función de la estimación de la pérdida de energía.

El módulo de calidad del agua permite realizar un análisis de calidad utilizando el esquema numérico QUICKEST-ULTIMATE (Leonard 1979, Leonard 1991) para resolver una ecuación unidimensional de advección dispersión.

Los componentes de la calidad del agua disponibles actualmente son:

- Nitrógeno de nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$)
- Nitrógeno de nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$)
- Nitrógeno orgánico (OrgN)
- Nitrógeno de amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$)
- Ortofosfato (PO_4)
- Algas (A)
- Demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBOC)
- Oxígeno disuelto (OD)

2.7.1.1 Ventajas del modelo HEC-RAS¹¹

- Software versátil, sencillo de manejar, ampliamente utilizado para simulaciones hidrodinámicas.
- Modelo gratuito respaldado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.
- El módulo hidrodinámico ha sido ampliamente utilizado en el medio de la ingeniería y es reconocido como apropiado y robusto en gran cantidad de aplicaciones.

¹¹ Castaño, J. (2015). Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá (tesis de maestría). Maestría en ingeniería recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

- La interfaz para manejo de datos de calidad del agua es amigable y altamente flexible, cómoda para el trabajo del usuario.

2.7.1.2 Modelo de cálculo para régimen estacionario¹²

HEC-RAS resuelve el flujo gradualmente variado a partir de la ecuación de balance de energía, entre dos secciones dadas, excepto en los casos en que simule estructuras como puentes, vertederos o tramos cortos entubados. En tales casos resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, así como ciertas ecuaciones de carácter empírico establecidas específicamente para estas estructuras.

El objetivo principal del programa HEC-RAS es calcular alturas de agua en todas las localidades de interés para determinados caudales. Los datos necesarios para realizar estos cálculos están divididos en: datos geométricos y datos de flujo. Y posteriormente, de acuerdo con el objetivo del estudio, los datos de calidad del agua.

2.7.1.2.1 Ecuación de la energía

La ecuación básica para estimación de la posición de la superficie libre del agua, en régimen permanente, es la ecuación de balances de energía, mediante la resolución de la ecuación de energía con un procedimiento iterativo llamado el método de paso estándar.

Por defecto HEC-RAS realiza 20 iteraciones por sección; en el caso de no encontrar una solución adecuada, compara la altura crítica con el menor error de la iteración. Si no concuerda con la altura con el régimen del problema y su error es menor a 10 cm el programa entrega ese valor. En ese caso de no cumplir con el régimen, arroja altura crítica en esa sección.

El programa considera el caso en que la pendiente longitudinal del río o canal es suficientemente pequeña como para poder aceptar que la vertical y la

¹² Guano, M.& Velasteguí, V. (2014, septiembre). Manual básico para la modelación numérica de la calidad del agua en ríos: programa computacional HEC-RAS versión 4.0. ejemplo de aplicación a un tramo del río Machángara dentro de la zona de influencia de la ciudad de Quito (Ingeniero ambiental). Escuela Politécnica Nacional.

perpendicular en un punto cualquiera coincidan. Si la sección 2 es una sección aguas arriba de la 1, a ecuación de energía se describe en la siguiente ecuación:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

Z_1, Z_2 = Cota de sección respecto a un plano de referencia arbitrario

Y_1, Y_2 = Calados en cada una de las secciones consideradas.

V_1, V_2 = Velocidades medias en cada sección. En el caso de régimen permanente se obtiene como el cociente entre el caudal circular y el área de la sección.

α_1, α_2 = Coeficiente de Coriolis estimados en cada sección. Permite corregir el hecho de que la distribución de velocidad en la sección se aleja de una distribución uniforme.

g = Aceleración de la gravedad.

h_e = Perdida de carga de energía. Debe incluir las pérdidas continuas por rozamiento con el contorno, así como las pérdidas localizadas que se den entre ambas.

Se puede observar los términos del balance de energía en la Figura 10.

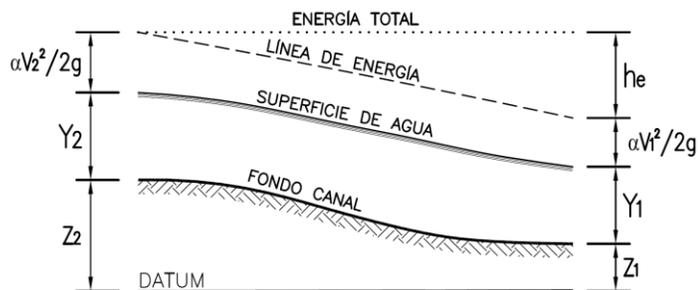


Figura 10. Representación de los términos del balance de energía. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.

La pérdida de carga de energía entre dos secciones transversales se compone de las pérdidas por fricción y pérdidas por contracción o expansión. La ecuación para la pérdida de energía se presenta a continuación:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Donde:

L = Longitud del tramo donde hay una concentración o una expansión

\bar{S}_f = Pendiente de fricción representativa entre dos secciones

C = Coeficiente de pérdidas por expansión

La distancia de longitud del alcance ponderada, L , se calcula mediante la ecuación:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Donde:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} = Distancia longitudinal de las secciones especificadas para cada caudal en la llanura de inundación izquierda, cauce principal y llanura de inundación derecha, respectivamente.

$\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}$ = Promedio aritmético de los caudales entre secciones para la llanura de inundación izquierda, cauce principal y llanura de inundación derecha respectivamente.

Al simular el flujo unidimensional, el programa permite representar la sección caracterizándola según las llanuras de inundación derecha (right overbank) e izquierda (left oberbank), separadas ambas por el cauce principal (main channel). (Bladé, Sánchez, Sánchez, Ninerola, & Gómez). Cada una de dichas partes se describe con el valor del coeficiente de Manning correspondiente y la distancia a la sección inmediatamente aguas abajo, para determinar el

transporte total y del coeficiente de velocidad para cada sección. (Cazcarra, 2014).

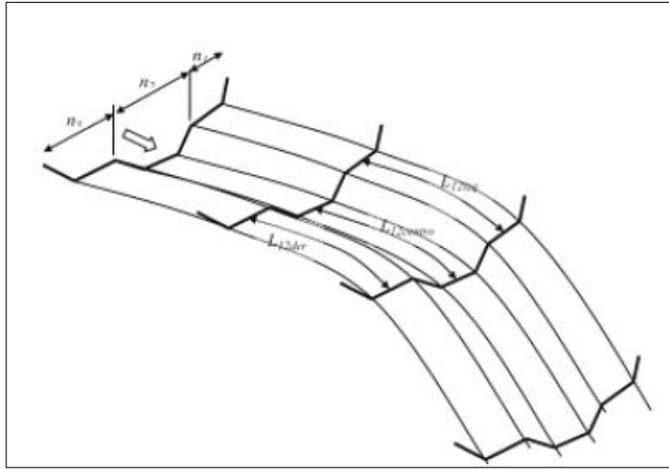


Figura 11. División por defecto en las secciones de HEC-RAS. Fuente: Manual de HEC-RAS

El cálculo del transporte se realiza mediante la ecuación de Manning (basada en unidades inglesas):

$$Q = K S_f^{1/2}$$

$$K = \frac{1.486}{n} A R^{2/3}$$

Donde:

K = La función transporte, que aglomera varios términos

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

A = Área de una unidad de la sección (principal o secundario)

R = Radio hidráulico de la sección llena (área/perímetro mojado)

El programa calcula todos los incrementos de la función transporte en cada unidad de sección. La correspondiente al cauce principal se calcula

normalmente como un elemento separado. Luego se asuma con las otras llanuras inundables izquierda y llanura inundable derecha. (Cazcarra, 2014)

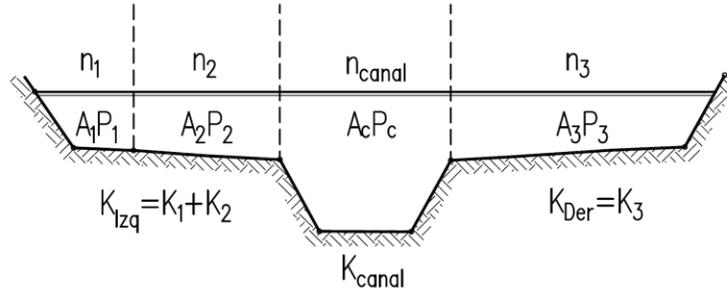


Figura 12. Subdivisión de la función de transporte K en las diferentes partes de la sección. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.

Una alternativa de cálculo posible en HEC-RAS es la de calcular la función de transporte entre cada coordenada de los puntos que definen una sección. Del mismo modo se suman las “K” izquierda y derecha:

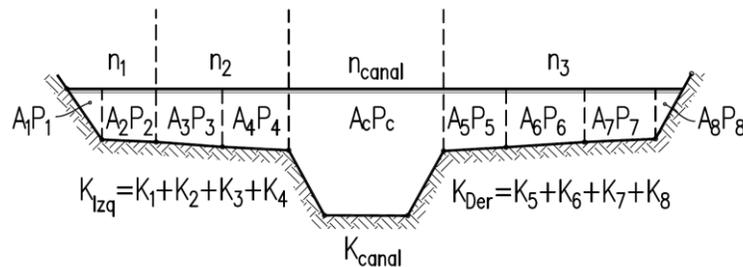


Figura 13. Ejemplo gráfico de esta alternativa de cálculo. Fuente: Manual de referencia hidráulica, HEC-RAS.

Los dos métodos de cálculo mencionados anteriormente producen resultados diferentes. HEC-RAS opta por la opción que con un mismo valor de calado obtenido tiene un menor valor de la función transporte.

2.7.1.2.2 Composición de la ‘n’ de Manning en el canal principal

El flujo en el canal principal no está subdividido, excepto cuando el coeficiente de rugosidad se cambia entre el área del canal. HEC-RAS comprueba la aplicabilidad de las subdivisiones de la rugosidad entre una

porción del canal principal y si no es aplicable el programa computa un solo valor de la 'n' de Manning. (Cazcarra, 2014)

HEC-RAS determina, según si la pendiente lateral del canal principal es mayor que 1:5 y el canal tiene más de una 'n' de Manning (en casi de tener llanura de inundación), entonces se computara un valor de 'n' compuesto.

La pendiente lateral se define como la distancia horizontal entre valores de 'n' adyacentes dentro del canal principal sobre la diferencia en elevación de las dos secciones transversales entre las que se encuentra el tramo.

Para la determinación de esta 'n' compuesta HEC-RAS emplea la siguiente ecuación:

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3}$$

Donde:

n_c = Corresponde al 'n' de Manning compuesta

P = Perímetro mojado de todo el canal principal

P_i = Perímetro mojado de una unidad o subdivisión de este canal

n_i = Coeficiente de rugosidad para cada subdivisión

La "n_c" compuesta debe ser comprobada de forma razonable. Este valor aparece en la salida de datos después de computar una simulación. En las simulaciones hidráulicas que se realizaran no se diferencian valores diferentes de 'n' de Manning para una misma sección, por tanto, este apartado es de menor importancia. (Cazcarra, 2014)

2.7.1.2.3 Evaluación de las pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción se evalúan como el producto de la variable S y la longitud L de cada tramo. Siendo Q el caudal y K un coeficiente que depende de la rugosidad.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2$$

Aunque también puede calcularse con cualquiera de estas cuatro expresiones siguientes. Pero el programa por defecto calcula con la primera de estas cuatro ecuaciones.

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_1}\right)^2$$

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2}$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} * S_{f2}}$$

$$\bar{S}_f = \frac{2 (S_{f1} * S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}}$$

2.7.1.3 Modelación de la temperatura en HEC-RAS¹³

El programa computacional utiliza la siguiente ecuación para determinar el transporte de calor de fuentes y sumideros.

$$Calor_{fuente/sumidero} = \frac{q_{net} A_s}{\rho_w c_{pw} V}$$

Donde:

q_{net} = flujo neto de calor a la interface aire-agua (W m⁻²)

ρ_w = densidad del agua (kg m⁻³)

¹³ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

C_{pw} = calor específico del agua ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

A_s = área de superficie de la célula de la calidad del agua (m^2)

V = volumen de la célula de la calidad del agua (m^3)

2.7.1.4 Modelación de las algas en HEC-RAS¹⁴

El modelo de calidad de agua soporta solo algas del fitoplancton flotando libremente y que consumen los nutrientes de la columna de agua.

La respiración y crecimiento de las algas afecta la concentración de algas (A), las concentraciones de nutrientes (NH_4 , NO_3 , PO_4 , $OrgN$ y $OrgP$), y oxígeno disuelto (OD). Durante el día, la fotosíntesis de algas produce oxígeno disuelto y durante la noche, en la respiración, utilizan oxígeno. Las algas utilizan fósforo y nitrógeno en sus formas inorgánicas disueltas (NH_4 , NO_3 , PO_4). Las algas son una fuente de las formas orgánicas de nitrógeno ($OrgN$) y fósforo ($OrgP$).

Los parámetros establecidos del usuario para las algas, los valores predeterminados y rangos sugeridos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de rango sugeridos para las constantes y parámetros de velocidad de algas

Símbolo	Descripción	Unidad	Qual2E Rango sugerido	Valor por defecto	θ^s
α_o	Conversión alga → clorofila-a	$\mu g\ Chla$ mgA^{-1}	10 - 100	10	No corrección
$\mu_{m\acute{a}x}$	Tasa máxima de crecimiento de algas	dia^{-1}	1.0 – 3.0	1.0	1.047
ρ	Tasa de respiración de las algas	dia^{-1}	0.05 – 0.5	0.05	1.047
KL	Constante de Michaelis- Menton de semisaturación (luz)	$Wmseg^{-1}$	4 - 20	4	No corrección
KN	Constante de Michaelis- Menton de	mgN / L	0.01 – 0.30	0.01	No corrección

¹⁴ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). p. 828.

Símbolo	Descripción	Unidad	Qual2E Rango sugerido	Valor por defecto	θ^s
	semisaturación (nitrógeno)				
KP	Constante de Michaelis- Menton de semisaturación (fósforo)	mgP / L	0.001 – 0.05	0.001	No corrección
λ_0	Coefficiente de extinción de la luz independiente de las algas	m^{-1}	≥ 0.03	0.03	No corrección
λ_1	Coefficiente lineal de auto-oscurcimiento producido por las algas	$m^{-1}/(\mu g$ Chla/L)	0.007 – 0.07	0.007	No corrección
λ_2	Coefficiente no lineal de auto-oscurcimiento producido por las algas	$m^{-1}/(\mu g$ Chla/L) ^{2/3}	variable	0.05	No corrección
σ_1	Tasa de producción béntica (algas)	M día ⁻¹	0.1 – 2.0	0.1	1.024

Fuente: manual del usuario Hec-Ras

^sCoefficiente de corrección de temperatura

2.7.1.5 Modelación de la DBOC en HEC-RAS¹⁵

Este programa adopta una reacción de primer orden para describir la desoxigenación de DBOC en el río. Las pérdidas de DBOC incluyen la sedimentación y la descomposición por oxidación: DBOC Fuente / sumideros-

$$\frac{dDBOC}{dt} = -K_1 DBOC - K_3 DBOC$$

$$DBOC \text{ Fuente/sumidero} = -K_1 DBOC \text{ (oxidación)}$$

$$-K_3 DBOC \text{ (sedimentación)}$$

Donde:

¹⁵ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

K_1 = Coeficiente de desoxigenación (día^{-1}), este parámetro establecido por el usuario y además es dependiente de la temperatura.

K_3 = Tasa de pérdida de DBO carbonoso por sedimentos (día^{-1}), este parámetro es establecido por el usuario y además es dependiente de la temperatura.

2.7.1.5.1 Coeficiente de desoxigenación (K_1)¹⁶

El coeficiente de desoxigenación carbonácea es la tasa con la que se consume el oxígeno por parte de los microorganismos para degradar la materia orgánica, es decir la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea.

Este coeficiente (K_1) es propia para cada recurso hídrico o agua residual, y es necesario determinarla para cada caso. Esta constante es indispensable para definir el comportamiento de la DBO en el tiempo.

En la literatura existen diferentes métodos matemáticos para determinar el coeficiente desoxigenación con base en las mediciones de DBO en laboratorio. Entre las más usadas se encuentran:

- Método de Thomas
- Logarítmico
- Método de laboratorio de Nemerov
- Mínimos cuadrados de Reed and Theriault
- De los momentos de Moore
- Los dos puntos de Rhame
- Diferencia diaria de Tsivoglou
- Método de regresión lineal de la NCASI

El método matemático logarítmico parte de la siguiente ecuación:

$$y = L_0(1 - e^{-k_1 t})$$

¹⁶ Guano, M.& Velasteguí, V. (2014, septiembre). Manual básico para la modelación numérica de la calidad del agua en ríos: programa computacional HEC-RAS versión 4.0. ejemplo de aplicación a un tramo del río Machángara dentro de la zona de influencia de la ciudad de Quito (Ingeniero ambiental). Escuela Politécnica Nacional.

Se deriva y se obtiene:

$$\frac{dy}{dt} = r = L_0 * k_1 * e^{-k_1 t}$$

Donde, r es la tasa de utilización del oxígeno en el tiempo. Realizando transformaciones matemáticas la ecuación anterior se transforma en una ecuación lineal de la forma:

$$\ln(r) = \ln(L_0 * k_1) - k_1 * t$$

Se grafica el Ln r contra t para diferentes valores de DBO, la pendiente será la constante K_1 y el intercepto será $L_0 * K_1$. Primero son necesarias las mediciones de DBO en un periodo de tiempo. Para cada tiempo se calcula el valor de r y Ln r. Para el calcula de r se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = \frac{(Y_n - Y_{n-1})}{\Delta t}$$

Donde:

Y_n es el valor de DBO para el cual se calcula r

Y_{n-1} es el valor de DBO del punto inmediatamente anterior

Δt es la variación del tiempo

2.7.1.5.2 Tasa de perdida de DBOC por sedimentos (K_3)

Se llama bentos, depósitos béticos o sedimentos a los residuos que existen sobre el lecho de río, formados por capas compactadas de residuos orgánicos parcialmente estabilizados, procedente fundamentalmente de descargas municipales e industriales.

“La tasa de perdida de DBOC por sedimentos (K_3), en la mayoría de los casos consultados, se la considera despreciable (Jha, Ojha, & Bhatia, 2007), esto se debe a que la materia orgánica se descompone muy lentamente y sus efectos sobre el oxígeno disuelto son inapreciables en ríos”. (Rodríguez Hurtado, 1983)

2.7.1.5.3 Constantes de velocidad y parámetros para DBOC

En la siguiente Tabla 2 se presentan los valores y rangos sugeridos para los parámetros de DBOC; el manual del usuario de HEC-RAS describe la mayoría de los coeficientes, por defecto se establece el valor más bajo para la modelación.

Tabla 2. Parámetros para fuentes y sumideros para DBOC

Símbolo	Descripción	Unidad	QUAL2E	Defecto	θ^{\S}
K ₁	Coefficiente de desoxigenación (DBOC)	día ⁻¹	0.02 – 3.4	0.02	1.047
K ₃	Tasa de sedimentación (DBOC)	día ⁻¹	-0.36 – 0.36	0	1.024

Fuente: Manual del usuario Hec-Ras

[§]Coefficiente de corrección de temperatura

2.7.1.6 Modelación del oxígeno disuelto en HEC-RAS¹⁷

El balance de oxígeno es un sistema acuático depende de la capacidad de reaireación de la corriente. Esta capacidad es una función de los procesos de advección y difusión que ocurre dentro del sistema acuático y de las fuentes y sumideros internos de oxígeno. La mayor fuente de oxígeno, además de la reaireación de la atmósfera, es la del oxígeno producido por la fotosíntesis y el oxígeno contenido en el flujo de ingreso. (EPA, 1978)

Las pérdidas incluyen la respiración de las algas, la demanda de oxígeno de sedimentos, la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBOC), la oxidación de amonio y nitrito: $OD_{Fuente/sumideros}$.

$$\frac{dOD}{dt} = K_2(O_{sat} - OD) + (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)A - K_1DBO - \frac{K_4}{d} - \alpha_5\beta_1NH_4 - \alpha_6\beta_3NO_2$$

$$OD_{Fuente/sumidero} = K_2(O_{sat} - OD) \text{ Reaireación}$$

¹⁷ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

$A (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)$ Fotosíntesis y respiración

$-K_1$ DBOC Demanda DBOC

$-K_4/d$ Consumo béntico de oxígeno

$-\alpha_5 \beta_1$ NH_4 Oxidación de amonio

$-\alpha_6 \beta_2$ NO_2 Oxidación de nitrito

Donde:

OD = concentración de oxígeno disuelto (mgOD/L)

Osat = concentración de oxígeno disuelto de saturación (mgO/L), este valor es calculado en función de la temperatura del agua.

α_3 = Producción específica de oxígeno por crecimiento de las algas (mgO/mgA), valor introducido por el usuario. Véase Tabla 3.

α_4 = Consumo específico de oxígeno por respiración de las algas (mgO/mgA), valor introducido por el usuario. Véase Tabla 3.

α_5 = Consumo específico de oxígeno para la oxidación de amonio (NH_4) (mgO/mgN), valor introducido por el usuario. Véase Tabla 3.

α_6 = Consumo específico de oxígeno para la oxidación de nitritos (NO_2) (mgO/mgN), valor introducido por el usuario. Véase Tabla 3.

μ = Tasa de crecimiento de las algas (días^{-1}). Valor dependiente de la temperatura.

P = Tasa de respiración de las algas (días^{-1}). Valor dependiente de la temperatura.

A = Concentración de la biomasa de las algas (mgA/L).

DBOC = Concentración de DBO carbonácea (mg/L)

K_1 = Coeficiente de desoxigenación (día^{-1}), este parámetro establecido por el usuario y además es dependiente de la temperatura.

K_2 = Tasa de reaireación (día^{-1}), este parámetro es fijado por el usuario y dependiente de la temperatura.

K_4 = Tasa de consumo demanda béntico de oxígeno ($\text{mgm}^2\text{día}^{-1}$), este parámetro es fijado por el usuario y dependiente de la temperatura.

β_1 = Tasa de oxidación biológica el amonio: oxidación de amonio a nitrito (día^{-1}).

β_2 = Tasa de oxidación biológica de los nitritos (día^{-1}).

d = Profundidad del canal promedio (m).

2.7.1.6.1 Constantes de velocidad y parámetros para OD

En la siguiente Tabla 3 se presentan los valores y rangos sugeridos para los parámetros de OD; el manual del usuario de HEC-RAS describe que, para la mayoría de los coeficientes, por defecto se establece el valor más bajo para la modelación.

Tabla 3. Parámetros para fuentes y sumidero para OD.

Símbolo	Descripción	Unidad	QUAL2E	Defecto	θ^s
α_3	O ₂ para el crecimiento de las algas	mgO mgA ⁻¹	1.4 – 1.8	1.4	No corrección
α_4	O ₂ para la respiración de las algas	mgO mgA ⁻¹	1.6 – 2.3	1.6	No corrección
α_5	O ₂ para la oxidación de amonio	mgO mgN ⁻¹	3.0 – 4.0	3.0	No corrección
α_6	O ₂ para la oxidación de nitritos	mgO mgN ⁻¹	1.0 – 1.14	1 - 0	No corrección
K_2	Tasa de reaireación	Día ⁻¹	0 - 100	0	1.024
K_4	Demanda béntica de oxígeno	mgO/m ² día	Variable	0	1.060

Fuente: Manual del usuario Hec-Ras

§Coeficiente de corrección de temperatura

2.7.1.7 Modelación del nitrógeno orgánico en HEC-RAS¹⁸

La única fuente interna de nitrógeno orgánico (OrgN) en el modelo es la respiración de las algas. Disminuye por la hidrólisis para formar el amonio y por la sedimentación del nitrógeno orgánico.

$$\frac{dOrgN}{dt} = \alpha_1 \rho A - \beta_3 OrgN - \sigma_4 OrgN$$

OrgN Fuente/sumidero = $\alpha_1 \rho A$ respiración de algas
 $-\beta_3 OrgN$ hidrólisis (OrgN→NH₄)
 $-\sigma_4 OrgN$ sedimentación

Donde:

α_1 = fracción de la biomasa de algas que es nitrógeno (mgN mgA⁻¹). Este es un parámetro establecido por el usuario. Ver Tabla 4.

ρ^* = la tasa de respiración de algas locales (dia⁻¹).

β_3 = constante de velocidad: hidrólisis de OrgN a amonio (dia⁻¹). Parámetro establecido por el usuario. Depende de la temperatura. Ver Tabla 4.

σ_4 = constante de velocidad: velocidad de sedimentación de N orgánico. Parámetro establecido por el usuario. Depende de la temperatura. Ver Tabla 4.

2.7.1.8 Modelación del nitrógeno amoniacal en HEC-RAS¹⁹

Las fuentes internas de amonio (NH₄) incluye hidrolisis de nitrógeno orgánico (OrgN), y la absorción (difusión) de los bentos. Sumideros internos incluyen la oxidación de amonio para formar nitrito (NO₂) y la absorción de algas.

$$\frac{dNH_4}{dt} = \beta_3 OrgN + \frac{\sigma_3}{d} - \beta_1 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD}) NH_4 - F_1 \alpha_1 \mu A$$

¹⁸ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

¹⁹ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

$$\begin{aligned}
\text{NH}_4 \text{ Fuente/sumidero} = & \beta_3 \text{OrgN Hidrolisis (OrgN} \rightarrow \text{NH}_4) \\
& + \frac{\sigma_3}{d} \text{Difusión de bentos} \\
& - \beta_1 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD}) \text{NH}_4 \text{ oxidación (NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2) \\
& - F_1 \alpha_1 \mu A \text{ consumo de algas}
\end{aligned}$$

Donde:

β_3 = constante de velocidad: hidrólisis de OrgN a amonio (dia^{-1}). Ver Tabla 4.

β_1 = constante de velocidad: oxidación de amonio a nitrito (dia^{-1}). La velocidad oxidación de NH_4 es fijado por el usuario. Ver Tabla 4.

σ_3 = tasa fuente de bentos: amonio ($\text{mgN m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). La tasa de fuente de bentos NH_4 es fijado por el usuario. Ver Tabla 4.

d = profundidad del canal promedio (m).

μ = tasa de crecimiento local de algas (dia^{-1}).

α_1 = fracción de la biomasa de algas que es nitrógeno (mgNmgA^{-1}). Ver Tabla 4.

KNR = coeficiente de primer orden de inhibición de la nitrificación (mgO^{-1}L). parámetro establecido por el usuario, generalmente ajustado a 0.6. Ver Tabla 4

GL = limitación de crecimiento de algas (sin unidades).

F_1 = fracción captada por las algas del almacenamiento de amonio (sin unidades).

La fracción captada por las algas del almacenamiento de amoniaco es un valor calculado. Es una función del factor de preferencia de nitrógeno (PN) introducido por el usuario y de las variables de estado amonio (NH_4) y nitrato (NO_3).

$$F_1 = \frac{P_N \text{NH}_4}{P_N \text{NH}_4 + (1 - P_N) \text{NO}_3}$$

El factor de preferencia para el amoniaco (PN) varía entre cero y uno.

Al establecer el valor 1 se indica que la preferencia de las algas es por el amonio (NH₄).

Al establecer el valor 0 se indica la preferencia de algas por nitrato (NO₃)

2.7.1.9 Modelación del nitrito en HEC-RAS²⁰

La fuente interna de nitrito (NO₂) es la oxidación de amonio (NH₄) a nitrito (NO₂).

El único sumidero modelado es la oxidación de nitrito (NO₂) a nitrato (NO₃).

Fuentes y sumideros para el almacenamiento de nitrito son:

$$\frac{dNO_2}{dt} = \beta_1 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NH_4 - \beta_2 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NO_2$$

$$NO_2 \text{ Fuente/sumidero} = \beta_1 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NH_4$$

Oxidación (NH₄→NO₂)

$$- \beta_2 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NO_2$$

Oxidación (NO₂→NO₃)

Donde:

β_1 = constante de velocidad: oxidación de amonio a nitrito (dia⁻¹). Ver Tabla 4.

β_2 = constante de velocidad: oxidación de nitrito a nitrato (dia⁻¹). Avanza rápidamente, dependiente de la temperatura. Ver Tabla 4.

KNR = coeficiente de primer orden de inhibición de la nitrificación (mgO⁻¹L).

2.7.1.10 Modelación del nitrato en HEC-RAS²¹

Para el nitrato, la única fuente interna de nitrógeno del nitrato es la oxidación de nitrito (NO₂) a nitrato (NO₃). El único sumidero modelado es la captación de las algas. Las fuentes y sumideros para el almacenamiento de nitrato son:

²⁰ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

²¹ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). p. 836.

$$\frac{dNO_3}{dt} = \beta_2 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NO_2 - (1 - F_1)\alpha_1\mu A$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_3 \text{ Fuente/sumidero} = & \quad \beta_2 (1 - \exp^{-KNR \cdot OD})NO_2 \\ & \text{Oxidación (NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3) \\ & -(1 - F_1)\alpha_1\mu A \text{ Captación algas} \end{aligned}$$

Donde:

β_2 = constante de velocidad: oxidación de nitrito a nitrato (dia⁻¹). Ver Tabla 4.

KNR = coeficiente de primer orden de inhibición de la nitrificación (mgO⁻¹L)

α_1 = fracción de la biomasa de algas que es nitrógeno, (mgN mgA⁻¹). Ver Tabla 4.

μ = tasa de crecimiento local de algas (dia⁻¹).

F_1 = fracción captada por las algas del almacenamiento de amonio (sin unidades).

Valores y rangos para los parámetros de nitrógeno sugeridos, se proporcionan en la Tabla 4.

Tabla 4. Constantes de velocidad y parámetros de nitrógeno

Símbolo	Descripción	Unidad	Qual2E Rango sugerido	Valor por defecto	θ^s
β_3	Constante de velocidad: hidrólisis de OrgN → NH ₄	dia ⁻¹	0.02 – 0.4	0.02	1.047
β_1	Constante de velocidad: NH ₄ → NO ₂	dia ⁻¹	0.10 – 1.0	0.1	1.083
β_2	Constante de velocidad: NO ₂ → NO ₃	dia ⁻¹	0.20 – 2.0	0.2	1.047

Símbolo	Descripción	Unidad	Qual2E Rango sugerido	Valor por defecto	θ^s
σ_4	Velocidad de sedimentación de N orgánico	dia ⁻¹	0.001 – 0.1	0.001	1.024
σ_3	Tasa fuente de bentos: amonio	mgN m ⁻² dia ⁻¹	variable	0	1.074
KNR	Coefficiente de primer orden de inhibición de la nitrificación	Sin unidades	0.6 – 0.7	0.6	No corrección
PN	Factor de preferencia de nitrógeno	Sin unidades	1 = NH ₄ 0 = NO ₃	1	No corrección
α_1	Fracción de la biomasa de algas que es nitrógeno	mgN mgA ⁻¹	0.07 – 0.09	0.07	No corrección

Fuente: Manual de usuario Hec-Ras

^sCoefficiente de corrección de temperatura

2.7.1.11 Modelación del fósforo orgánico en HEC-RAS²²

La única fuente de fósforo orgánico (OrgP) en un cuerpo de agua, es la respiración de las algas. Los sumideros internos para fósforo orgánico son el decaimiento del fósforo orgánico para formar ortofosfato (PO₄), y la sedimentación. La ecuación para fuentes y sumideros para el almacenamiento de fósforo orgánico son:

$$\frac{dOrgP}{dt} = \alpha_2 \rho A - \beta_4 OrgP - \sigma_5 OrgP$$

$$\begin{aligned} \text{OrgP Fuente/sumidero} = & + \alpha_2 \rho A \text{ Respiración de algas} \\ & - \beta_4 OrgP \text{ Decaimiento (OrgP} \rightarrow \text{PO}_4) \\ & - \sigma_5 OrgP \text{ Sedimentación} \end{aligned}$$

²² Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

Donde:

OrgP = Concentración de fósforo orgánico (mgP/L).

β_4 = Tasa de solubilidad de fósforo orgánico: oxidación de OrgP a PO_4 (dia^{-1}).
Parámetro establecido por el usuario. Dependiente de la temperatura. Véase Tabla 5.

σ_5 = tasa de sedimentación de fósforo orgánico (dia^{-1}). Parámetro establecido por el usuario. Dependiente de la temperatura. Véase Tabla 5.

ρ = Tasa de respiración de algas locales (dia^{-1}).

α_2 = Contenido específico de fósforo en la biomasa de las algas. (mgP mgA^{-1}).
Parámetro establecido por el usuario. Véase Tabla 5.

2.7.1.12 Modelación del ortofosfato en Hec-Ras²³

Hay dos fuentes internas de fosfatos disueltos (PO_4): el decaimiento de fósforo orgánico (OrgP), y difusión de los bentos. El único sumidero interno de fosfato (PO_4) es la captación por las algas. La ecuación diferencial que gobierna el almacenamiento de ortofosfato es:

$$\frac{dPO_4}{dt} = \beta_4 OrgP + \frac{\sigma_2}{d} - \alpha_2 \mu A$$

$$\begin{aligned} PO_4 \text{ Fuente/sumidero} = & \quad \beta_4 OrgP \text{ Decaimiento (OrgP} \rightarrow PO_4) \\ & + \frac{\sigma_2}{d} = \text{Difusión de bentos} \\ & - \alpha_2 \mu A \text{ Captación por algas} \end{aligned}$$

Donde:

PO_4 = concentración de ortofosfato (mgP/L).

²³ Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

σ_2 = Tasa de producción béntica de fósforo disuelto: ortofosfato (PO_4) ($\text{mgP m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Parámetro establecido por el usuario. Dependiente de la temperatura. Véase Tabla 5.

μ = tasa de crecimiento local de algas (dia^{-1})

α_2 = Fracción de la biomasa de algas que es fósforo (mgP mgA^{-1}). Véase Tabla 5.

d = profundidad media del canal (m)

Valores y rangos para los parámetros de fósforo sugeridos, se proporcionan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para fuentes y sumideros de fósforo

Símbolo	Descripción	Unidad	Qual2E Rango sugerido	Valor por defecto	θ^s
β_4	Tasa de solubilidad del fósforo orgánico $\text{OrgP} \rightarrow \text{PO}_4$	dia^{-1}	0.01 – 0.7	0.01	1.047
σ_5	Tasa de sedimentación de fósforo orgánico	dia^{-1}	0.001 – 0.1	0.001	1.024
σ_2	Tasa de producción de béntica de fósforo disuelto	$\text{mgP m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$	variable	0.0	1.074
α_2	Contenido específico de fósforo en la biomasa de las algas	mgP mgA^{-1}	0.01 – 0.02	0.01	No corrección

Fuente: Manual de usuario Hec-Ras

^sCoeficiente de corrección de temperatura

2.8 Marco legal

A continuación, se presenta el resumen de la normatividad aplicada en Colombia en referencia de calidad del agua.

Tabla 6. Marco legal considerado para modelos de calidad del agua.

Ley	Descripción
Ley 99 de 1993	Se encarga de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. (En el Título VI, se definen las Corporaciones Autónomas Regionales –CAR– su objetivo es proteger el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible).
Decreto 1076 de 2015	El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, sin perjuicio de las funciones asignadas a otros sectores.
Resolución 631 de 2015	Reglamentación de los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
Acuerdo 43 de 2006	Objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020.
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, reglamentación de los procesos de estudio y monitoreo de la calidad de los recursos hídricos y vertimientos.

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Relación de normatividad asociada a temas ambientales y de calidad del agua.

LEYES	DECRETOS	RESOLUCIONES
<u>Ley No. 1625 de 2013</u>	<u>Decreto No. 2245 de 2017</u>	<u>Resolución No. 959 de 2018</u>
<u>Ley No. 373 de 1997</u>	<u>Decreto No. 1076 de 2015</u>	<u>Resolución No. 957 de 2018</u>
<u>ley No. 161 de 1994</u>	<u>Decreto No. 1640 de 2012</u>	<u>Resolución No. 751 de 2018</u>
<u>Ley No. 99 de 1993</u>	<u>Decreto No. 2667 de 2012</u>	<u>Resolución No. 0631 de 2015</u>
<u>Ley No. 10 de 1978</u>	<u>Decreto No. 0303 de 2012</u>	<u>Resolución No. 1207 de 2014</u>
<u>Ley No. 23 de 1973</u>	<u>Decreto No. 4728 de 2010</u>	<u>Resolución No. 1907 de 2013</u>
	<u>Decreto No. 3930 de 2010</u>	<u>resolución No. 0509 de 2013</u>
	<u>Decreto No. 2372 de 2010</u>	<u>resolución No. 1514 de 2012</u>
	<u>Decreto No. 3200 de 2008</u>	<u>Resolución No. 955 de 2012</u>

LEYES	DECRETOS	RESOLUCIONES
	<u>Decreto No. 3600 de 2007</u>	<u>Resolución No. 0075 de 2011</u>
	<u>Decreto No. 1775 de 2007</u>	<u>Resolución No. 4716 de 2010</u>
	<u>Decreto No. 1575 de 2007</u>	<u>Resolución No. 1023 de 2010</u>
	<u>Decreto No. 1480 de 2007</u>	<u>Resolución No. 493 de 2010</u>
	<u>Decreto No. 1449 de 1977</u>	<u>Resolución No. 0941 de 2009</u>
	<u>Decreto No. 1324 de 2007</u>	<u>Resolución No. 2115 de 2007</u>
	<u>Decreto No. 1323 de 2007</u>	<u>Resolución No. 0974 de 2007</u>
	<u>Decreto No. 900 de 2006</u>	<u>Resolución NO. 0872 de 2006</u>
	<u>Decreto No. 0321 de 1999</u>	<u>Resolución No. 104 de 2003</u>
	<u>Decreto No. 1311 de 1998</u>	<u>Resolución No. 0081 de 2001</u>
	<u>Decreto No. 3102 de 1997</u>	<u>Resolución No. 372 de 1998</u>
	<u>Decreto No. 2811 de 1974</u>	

Fuente: MinVivienda

2.9 Metodología de la investigación

Inicialmente se realizó recopilación de información del área de estudio con el fin de localizar la corriente principal junto a sus tributarios. Luego una salida de campo para realizar actividades preliminares, posteriormente, se georreferenciaron las ubicaciones de los aforos y los puntos para el ensayo de trazadores, para determinar los tiempos de viaje de la masa de agua, con el fin de establecer un horario para la toma de muestras de calidad sobre el tramo objeto de evaluación y realizar el análisis en el laboratorio.

Definido el tramo, los datos geométricos, hidrológicos, meteorológicos y los valores del OD y DBOC, se construye primero el modelo hidráulico y se calibra, después se desarrolla el modelo de calidad del agua del río Lindo y se calibra con la información obtenida de la campaña, donde se pretende aproximar los valores modelados con los valores reales tomados en la corriente, finalmente se realiza tres simulaciones alternativas futuras.

En la siguiente figura 14, representa esquemáticamente la metodología aplicada a este estudio para la modelación de la calidad del agua para el río Lindo.

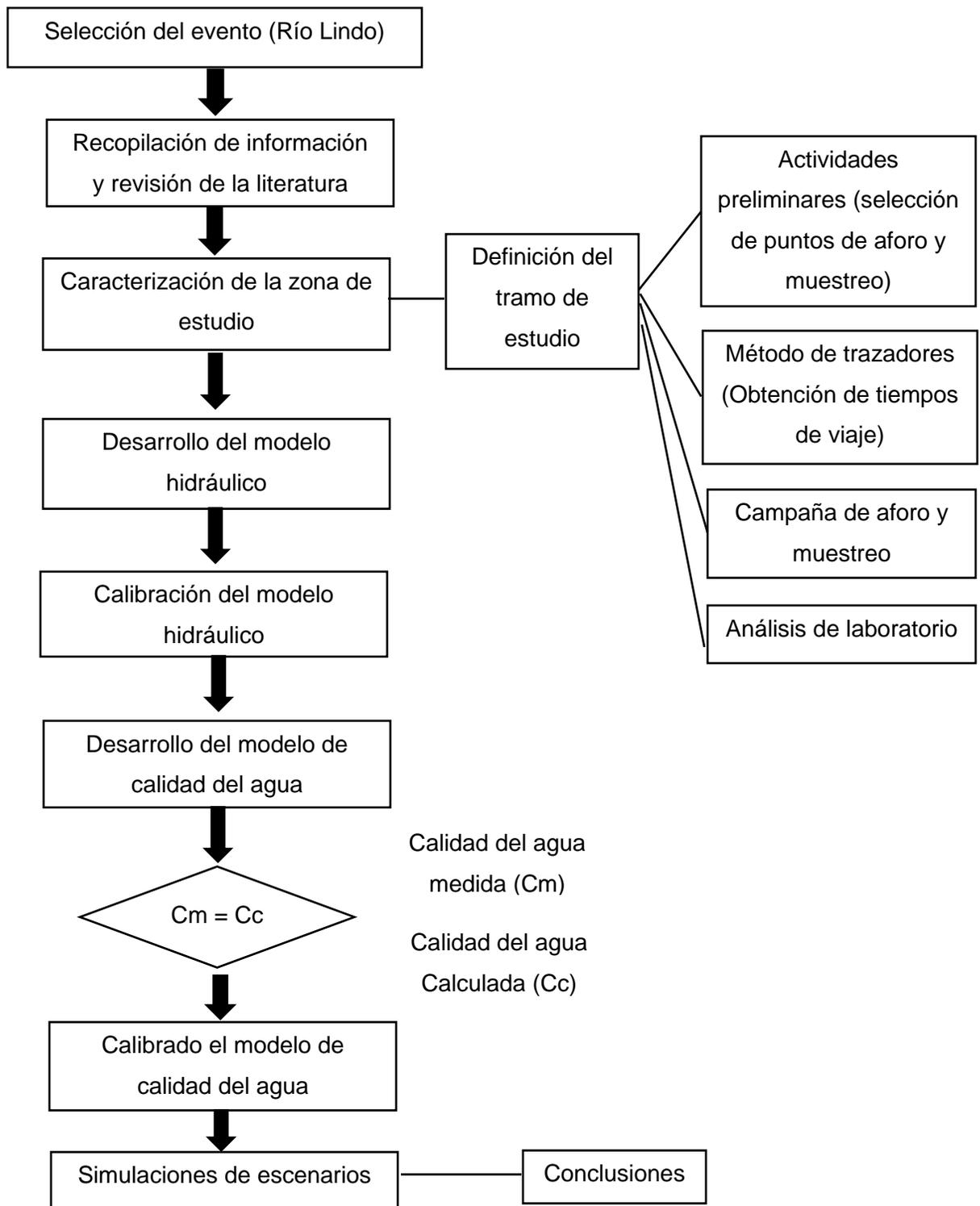


Figura 14. Metodología aplicada. Fuente: elaboración propia.

3 CAPÍTULO Descripción de la zona de estudio

Este capítulo presenta una descripción detallada del área de estudio, estableciendo la localización del río, las características climáticas y geológicas de la zona.

El río Lindo se encuentra ubicado en el municipio de Viotá y sus aguas desembocan en el río Calandaima, perteneciente a la parte baja de la cuenca del río Bogotá; la cuenca del río Lindo tiene aproximadamente un área de 45,11 Km² y un perímetro de 31,0 Km.

3.1 Localización general del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Viotá, se encuentra en el departamento de Cundinamarca al Sur occidente de Bogotá, D.C., a 86 km de Bogotá en la provincia de Tequendama; en un área aproximada de 9360 hectáreas, esta área se encuentra conformada por las cuencas de las quebradas San Juana, La Pilama y el Río Lindo. Ver figura 15, de la ubicación geográfica del municipio de Viotá en el departamento de Cundinamarca.

De acuerdo con las coordenadas MAGNA SIRGAS la ubicación geográfica del municipio es:

Tabla 8. Coordenadas geográficas municipio de Viotá

LATITUD	LONGITUD	Cota m.s.n.m.
4° 26' 22.488" N	74° 31' 16.032" W	600 a 530

Fuente: IGAC

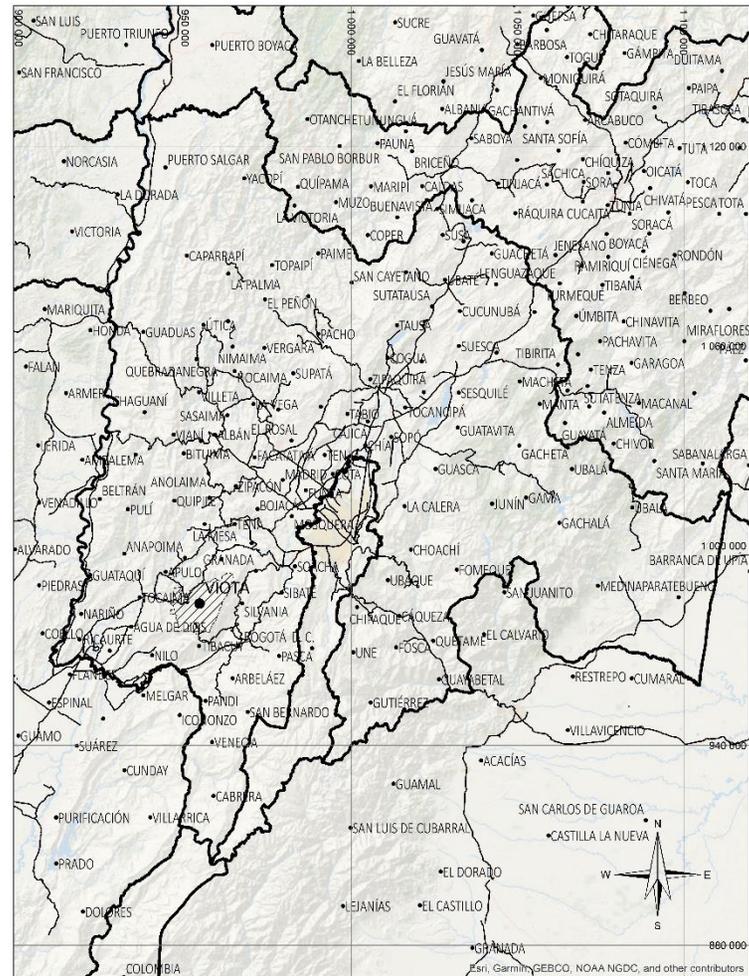


Figura 15. Localización del municipio de Viotá – Cundinamarca. Fuente: IGAC

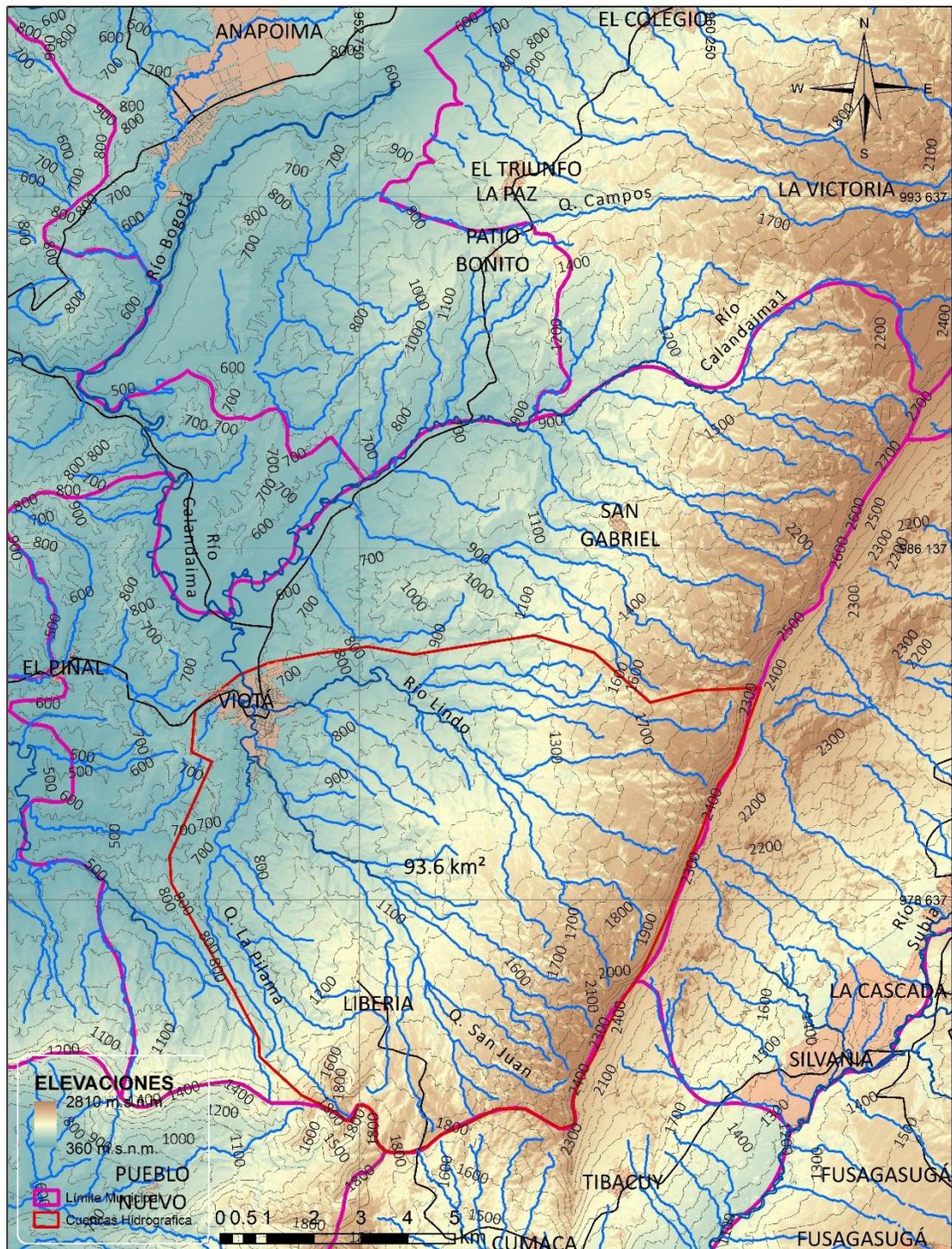


Figura 16. Localización general del área de estudio. Fuente: IGAC

Con más detalle se puede observar en la figura 17, las características de las quebradas San Juana, Pilama y Río Lindo convergen en el casco urbano del municipio de Viotá y la cota divisoria de aguas es en la 2500 m.s.n.m., correspondientes a corrientes de tipo montañoso.

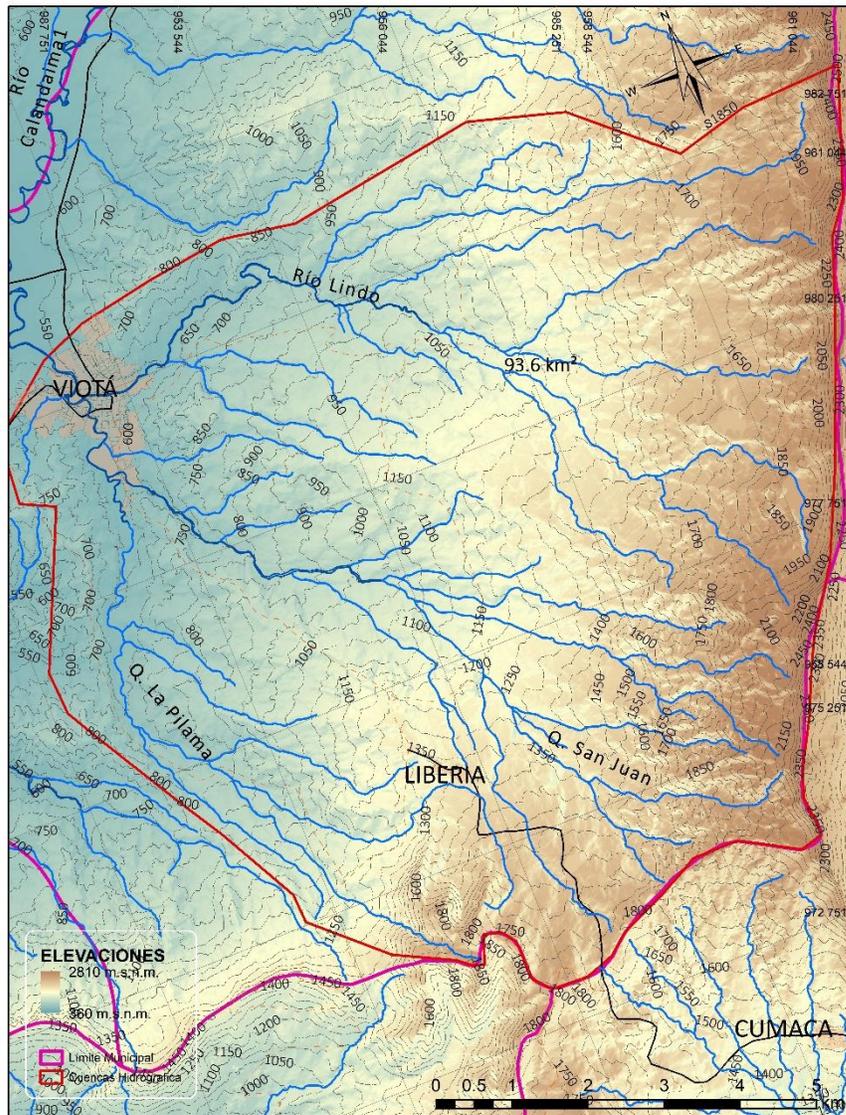


Figura 17. Localización detallada del río Lindo. Fuente: IGAC

3.2 Climatología

Alrededor del municipio de Viotá se encuentran estaciones climatológicas activas que cubren esta zona y sirven para la descripción espacial y temporal de las

principales variables climatológicas como la temperatura, precipitación, brillo solar y humedad relativa. Algunas de las estaciones son propiedad de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y las otras pertenecen a la red del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. A continuación, se muestran las estaciones de precipitación y climatológicas más cercanas al municipio de estudio, la ubicación en forma de círculos que pertenecen a la CAR y en triángulos al IDEAM.

En el área de estudio se encuentran las siguientes estaciones hidroclimatológicas donde se muestra en la Tabla 9 el tipo de estación y sus características principales (nombre, tipo, código).

Tabla 9. Estaciones hidrometereológicas en el área de estudio.

CODIGO	MUNICIPIO	CORRIENTE	ORIGEN	CLASE	CATEGORIA
21190030	TIBACUY	SUBIA	IDEAM	MET	PG
21190250	TIBACUY	CHOCHO	IDEAM	MET	PM
21190460	PASCA	BATAN	IDEAM	MET	PM
21197210	SILVANIA	QDA SAN JOSE	IDEAM	HID	LG
21201090	VIOTÁ	LINDO	IDEAM	MET	PM
21202160	EL COLEGIO	BOGOTA	IDEAM	MET	PM
21205660	ANAPOIMA	BOGOTA	IDEAM	MET	CO
21206160	EL COLEGIO	BOGOTA	IDEAM	MET	CP
21208250	VIOTÁ	LINDO	IDEAM	HID	LM
3502019	VIOTÁ	R. BLANCO	CAR	MET	PM
3502017	VIOTÁ	R. NEVADO	CAR	MET	PM
3502015	APULO	R. SAN JUAN	CAR	MET	PM
3502016	VIOTÁ	R. SAN JUAN	CAR	MET	PM

Fuente: IDEAM, CAR

MET: Metereológica
HID: Hidrometereológica
PM: Pluviométrica
LG: Linmigráfica

CO: Climatológica ordinaria
CP: Climatológica principal

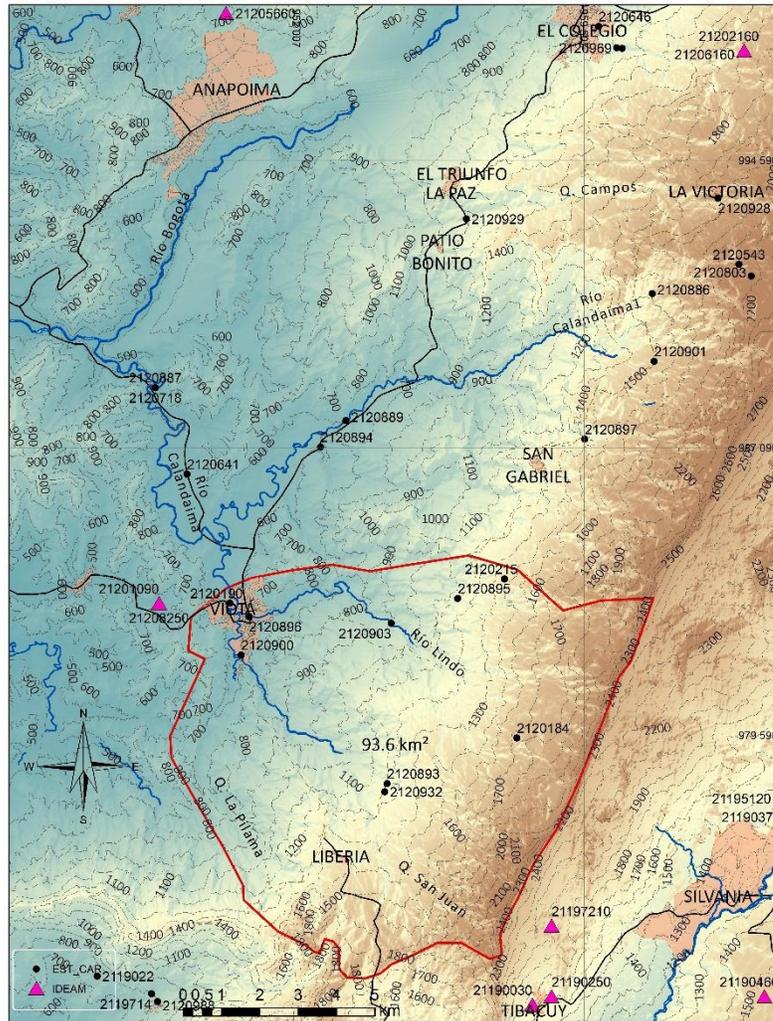


Figura 18. Mapa de estaciones Red CAR y Red IDEAM – municipio de Viotá. Fuente:
Elaboración propia, IDEAM, CAR

3.2.1 Precipitación media mensual multianual

La precipitación media mensual multianual es medida en milímetros y es el promedio multianual de la precipitación total mensual.

“El municipio de Viotá se distingue un ciclo bimodal de precipitaciones, es decir, dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas en el año. Las temporadas secas se dan en los meses junio-septiembre y diciembre-enero y las temporadas lluviosas se

presentan entre marzo-mayo y octubre-noviembre. El total de precipitación multianual es de 1435.4 mm”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015).

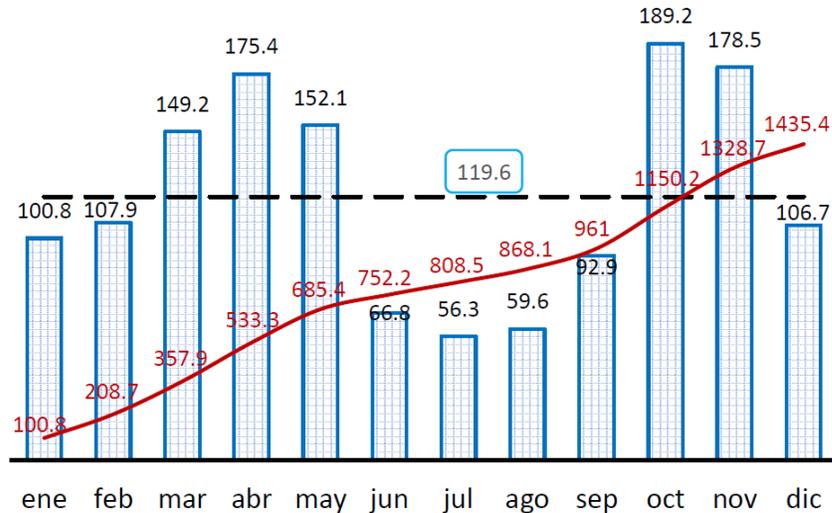


Figura 19. Precipitación media mensual multianual cuenca Río Lindo. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S.

3.2.2 Temperatura media mensual multianual

La temperatura media mensual multianual es medida en grados Celsius y es el promedio multianual de la temperatura media mensual.

“La temperatura del municipio de Viotá no muestra grandes variaciones durante al año. El valor superior es aproximadamente 26°C y su valor mínimo de temperatura media es de 12°C”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015)

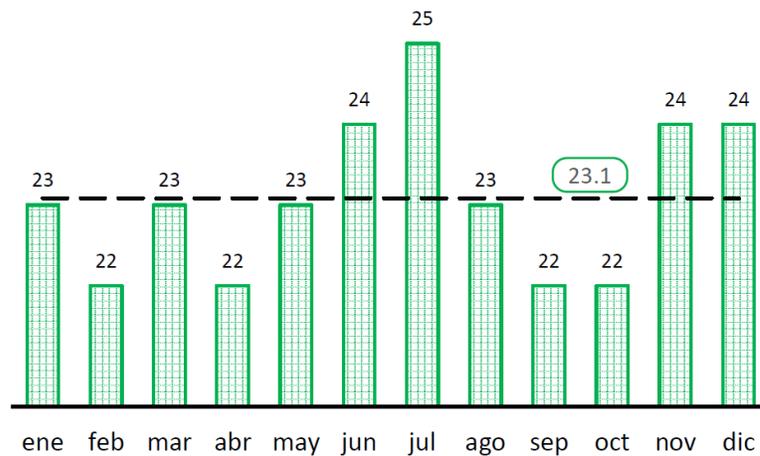


Figura 20. Histograma de temperatura media mensual multianual. Fuente: UT AVR-CAR 2015, a partir de información del IDEAM (2013) e IGAC (2010)

3.2.3 Humedad relativa media mensual multianual

La humedad relativa media mensual multianual es dada en porcentaje (%) y es el promedio multianual de la humedad relativa media mensual.

“En los meses de abril, mayo, noviembre y diciembre se presentan los porcentajes superiores de humedad relativa y los valores inferiores en los meses de agosto y septiembre”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015)

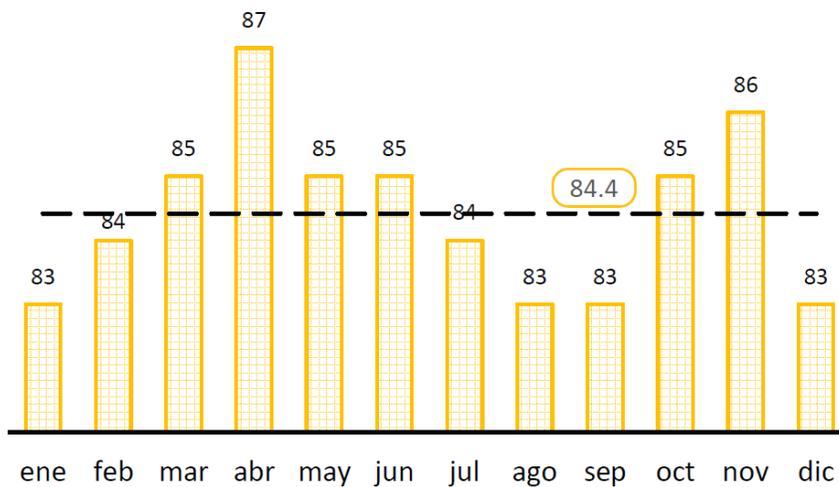


Figura 21. Histograma de humedad relativa media mensual multianual. Fuente: UT AVR-CAR 2015, a partir de información del IDEAM (2013) e IGAC (2010)

3.2.4 Brillo solar

El brillo solar promedio mensual multianual es medido en horas y es el promedio multianual del brillo solar promedio mensual.

“Los valores del brillo solar varían entre 121 y 167 horas mensuales. La mayor incidencia de los rayos solares se presenta en los meses de enero y octubre con 167.4 horas/mes y 150.24 horas/mes, los valores mínimos se de brillo solar se registran en el mes de abril con 121.3 horas/mes”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015).

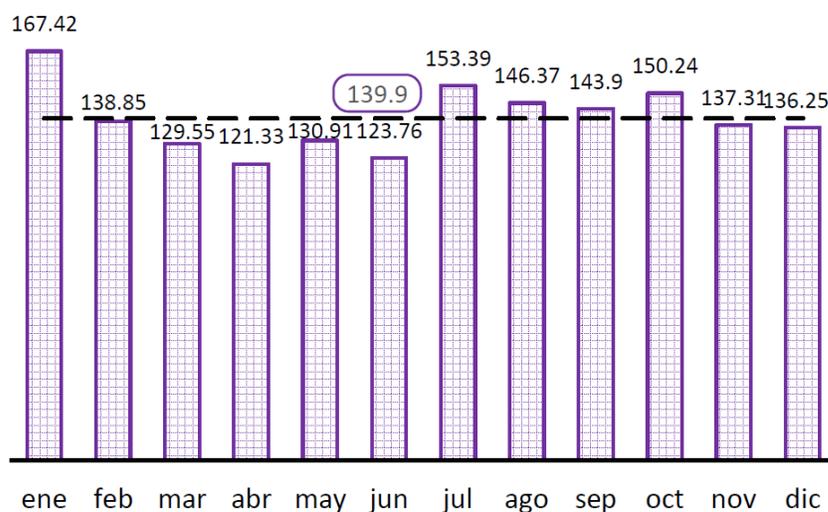


Figura 22. Brillo solar estación Esc. Samper Madrid. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S

3.2.5 Caracterización climática

“En el municipio de Viotá predominan los pisos térmicos templado y cálido, con temperaturas entre 20 y 26 °C y precipitaciones que varían entre 1165 mm y 2549 mm, esta información es obtenida por las estaciones cercanas a la región”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015)

3.3 Geología

En el departamento de Cundinamarca las rocas más antiguas son secuencias metamórficas de edad paleozoica inferior, seguida por una serie de estratos sedimentarios depositados de manera intermitente entre los 160 millones y los 65

millones de años, que se extienden en el altiplano de Bogotá y en el flanco occidental y oriental de la Cordillera Oriental (Baquero, M., 1991). Las rocas de la edad paleozoica temprana afloran en gran parte del sector oriental de la cordillera, sin embargo en el departamento de Cundinamarca solo se registran pequeñas áreas representadas por rocas metamórficas que alcanzaron condiciones de esquistos verdes (De la Espriella 1985); mientras que el paleozoico superior si aflora y está caracterizado por secuencias de facies sedimentarias con altos contenidos de areniscas cuarzosas, conglomerados, arcillas rojizas y moradas, y shales negros. Para el mesozoico las secuencias adquirieron características de ambientes depositacionales tanto marino como continental (Irving 1971).

3.3.1 Estratigrafía

“Las cuencas de la Quebrada Pilama y San Juana y el Río Lindo, está conformada de base hasta techo por el grupo Villeta (las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes, Hilo, Simijaca, La frontera, Conejo), el grupo Guadalupe, grupo Olini y por depósitos cuaternarios. La nomenclatura litoestratigráfica es la propuesta por Ulloa et al. (1193), a continuación, se presenta cronológicamente las unidades geológicas presentes en la zona de estudio”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015)

Tabla 10. Correlación de las unidades geológicas que afloran en las cuencas del río Lindo, Quebradas Pilama y San Juana.

	UNIDAD DE TIEMPO	UNIDAD GEOLÓGICA	NOMBRE	NOMENCLATURA
Cuaternario	Holoceno		Depósitos fluvio-glacial	Ofg
	Pleistoceno	Depósitos cuaternarios	Depósitos Aluviales	Qal
			Depósitos Coluviales	Qc
Cretácico	Campaniano	Grupo Guadalupe (Ksg)	Fomación Labor y Tierna	Ksglt
			Fomación Plaeners	Ksgpl
			Fomación Arenisca Dura	Ksgd
	Santoniano Coniaciano Turoniano Cenomaniano	Grupo Olini (Kso)	Fomación Lidita inferior	Ksli
			Nivel de Lutitas	Ksl
			Fomación Conejo	Kscn
			Fomación La Frontera	Ksf
			Fomación Simijaca	Kss
Albiano	Grupo Villeta	Fomación Hiló	Kih	
		Fomación Pacho	Kslp	
			Fomación Capotes	Kic

UNIDAD DE TIEMPO	UNIDAD GEOLÓGICA	NOMBRE	NOMENCLATURA
Aptiano		Fomación Socotá	Kis
Barroniano		Fomación Trinchera-Miembro el tigre	Kitrt

Fuente: INGEOMINAS, hoy SGC. 1998

3.4 Descripción del tramo de estudio

Para la modelación de la calidad del agua se ha considerado el tramo comprendido entre la piscina municipal y el terreno donde está proyectada la PTAR en el sector de San Antonio, extendida hasta la desembocadura en el río Calandaima, su área es de aproximadamente 93.6 km², un perímetro de 40.60 km y la longitud del cauce principal es de 12.5 km. Algunas de las características del sistema de drenaje del río Lindo son: el tipo de red es angulado, sinuosidad de 1.25, su cota de nacimiento 2147.4 m.s.n.m. y pendiente media 12.7%.

La dirección del flujo se encuentra de oriente a oeste, desde el sector de la piscina municipal en el barrio Santa Lilibana hasta el sector de San Antonio. Por lo que se consideró como la zona de aguas arriba a la piscina y zona aguas abajo San Antonio. En la tabla 11 se encuentran las coordenadas del punto inicial y final del tramo.

Tabla 11. Ubicación del tramo de la piscina municipal – San Antonio.

Sector	Este	Norte	Observación
Piscina municipal	951011.98	982657.40	Zona aguas arriba
Vereda San Antonio	949829.27	983823.28	Zona aguas abajo

Fuente: elaboración propia

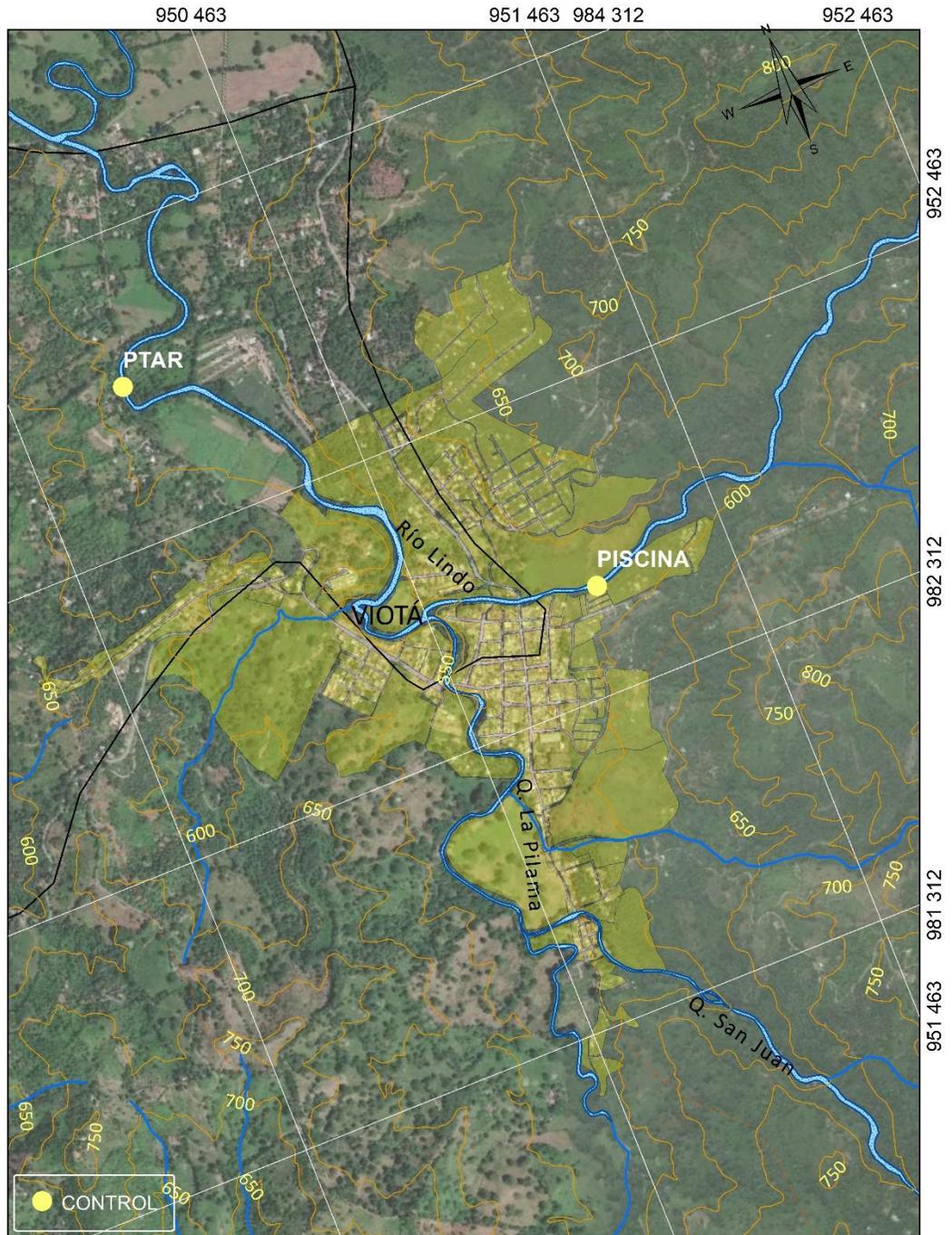
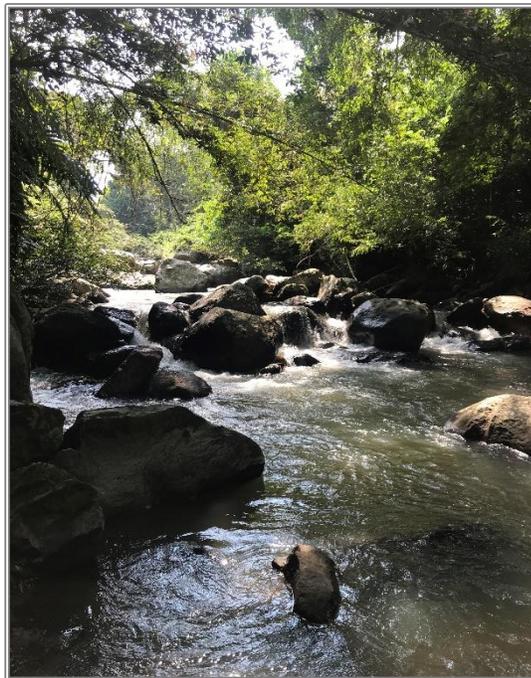


Figura 23. Ubicación general del tramo de evaluación. Fuente: IGAC, elaboración propia.

En el barrio Santa Lilibiana se encuentra un balneario municipal, este lugar se puede considerar una sección de control porque se encuentra un vertedero, en esta zona el flujo es crítico presentándose en el pie del vertedero un remanso.



Fotografía 1. Punto de Control – Vertedero zona de piscina Fuente: elaboración propia



Fotografía 2. Sección cauce Rio Lindó aguas abajo de la zona de la piscina. Fuente: elaboración propia

Siguiendo el recorrido se logra observar la gran cantidad de material de arrastre de la zona torrencial en este caso sedimento grueso; más adelante desde la piscina municipal aproximadamente 576 metros aguas abajo se encuentra la confluencia de la quebrada Pilama y el río Lindo, esta zona de estudio el material del lecho es de tipo granular de pequeñas a medianos diámetros. En este sector se presenta bancas o llanuras de inundación con presencia de árboles de diferentes tipos, tanto de margen izquierdo como la derecha.



Fotografía 3. Confluencia del Río Lindo (Izq.) y la quebrada Pilama (Der.). Fuente: elaboración propia

Siguiendo el cauce se observa el mayor socavamiento se da en las paredes superiores de su curso, donde es mayor el gradiente y la carga de sedimentos es más gruesa. Se encuentran rocas más resistentes, el curso es muy irregular con la presencia de saltos producto del cambio de resistencia en la roca, fallamientos o deslizamientos que conforman apilamientos.

El restante del río Lindo su cauce principal relativamente libre de obstáculos y bien definido hasta desembocar en el río Calandaima.

En la zona proyectada de la PTAR, se presenta un cauce recto, y con buena pendiente, que se observa con la forma del cauce recto.



Fotografía 4. Panorámica del cauce en la zona de la PTAR proyectada. Fuente: elaboración propia

4 CAPÍTULO Características generales de la salida de campo y laboratorio

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la caracterización de la calidad del agua del río Lindo, la Quebrada Pilama y también incluyendo los vertimientos domésticos por el municipio de Viotá. A continuación, se describe en forma más detallada las actividades realizadas en campo y en el Laboratorio de Aguas del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

4.1 Actividades preliminares

Para los trabajos con la sonda multiparamétrica, en el laboratorio de ambiental de la Escuela se calibró las sondas con solución salina de concentración conocida la cual se asocia con la conductividad, así, garantizar la calidad de los resultados en campo. Ver Fotografía 5.



Fotografía 5. Calibración de las sondas en el laboratorio. Fuente: elaboración propia

Se realizó visita previa al río Lindo y a la quebrada Pilama para determinar las coordenadas y también marcar las zonas donde se cumplieron las diferentes actividades como el aforo, la toma de muestras y para el ensayo de trazadores mediante monitoreo de la conductividad del agua y su variación al descargar masas de solución salina.

La Fotografía 6 muestra la sección identificada como 1, la más aguas arriba del estudio donde se realizó el punto de muestreo y aforo de caudal. La sección identificada como 2C se llevó a cabo aforo de caudal y conductividad y la sección identificada como 8M es lugar de mezcla de vertimiento de la sal diluida para la conductividad.



Fotografía 6. Primera ubicación muestreo y aforo. Fuente: elaboración propia



Fotografía 7. Ubicación de conductividad y mezcla. Fuente: elaboración propia

Para el caso de las tuberías de aguas residuales encontradas en el área urbana del municipio de Viotá que descargan directamente al río de estudio, se eligieron las más representativas en comparación a otras, con respecto a su caudal.

4.2 Aforo

El aforo se llevó a cabo utilizando el método por vadeo utilizando para la medición de la velocidad de flujo el equipo Flowtracker 2, en diferentes puntos a lo largo de las secciones transversales definidas en el cauce del río Lindo y la quebrada Pilama. Se procedió a la toma de detalles de la sección del río como velocidad media, profundidad media, temperatura media, ancho total, área y caudal totales. En la figura 24 se muestra la ubicación en planta de las diferentes secciones de aforo y en la Fotografía 8 se observa el levantamiento topográfico con el equipo usado en la sección 1-1, correspondiente a de la piscina municipal.

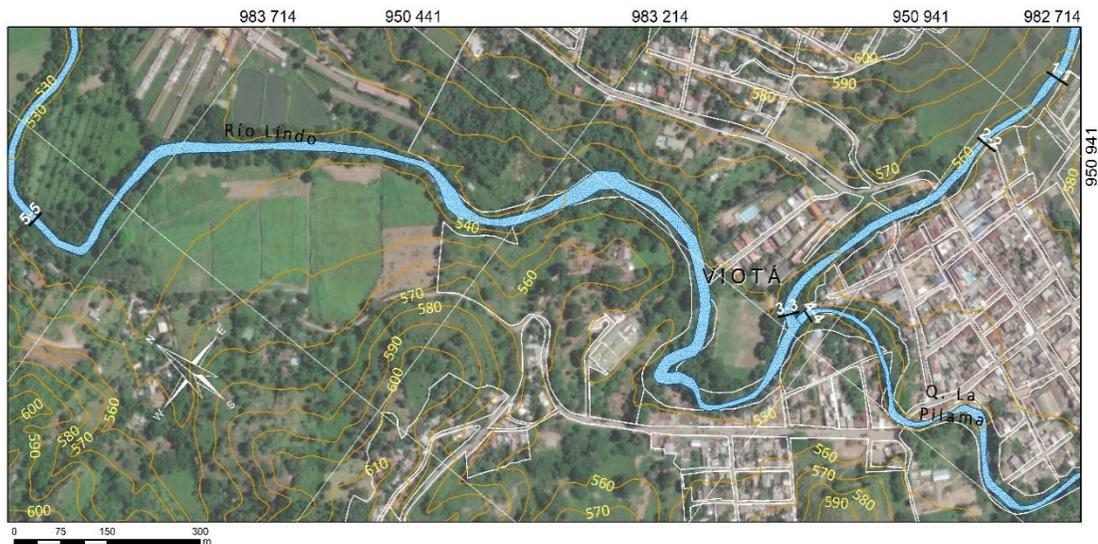


Figura 24. Ubicación en planta de las secciones de aforo. Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Secciones de aforo sobre el río Lindo y Q. Pilama

Sección	Lugar
1-1	Piscina comunal, Aforo caudal
2-2	Punto C2, Aforo Caudal
3-3	Aguas arriba río Lindo con Q. Pilama

Sección	Lugar
4-4	Aguas arriba Q. Pilama con río Lindo
5-5	Sector de la PTAR

Fuente: elaboración propia



Fotografía 8. Aforo en la sección 1-1. Fuente: elaboración propia

4.2.1 Datos obtenidos del flowtracker 2

La caracterización hidráulica y geométrica de los tramos de interés obtenidas por el equipo flowtracker 2 fueron la velocidad media, profundidad media, temperatura media, ancho total, área total, caudal total y su sección transversal.

A continuación, en las siguientes tablas se presentan los datos registrados por el equipo para las secciones de aforo.

Tabla 13. Datos de campo para la sección 1-1

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0.0	0.0	0.70	0.000	0.000	0.009	0.144	0.0013
1	0.2	0.2	0.74	0.148	0.013	0.020	0.149	0.0030
1	0.2	0.8	0.74	0.592	0.023	0.020	0.149	0.0030
2	0.4	0.2	0.75	0.150	0.019	0.021	0.302	0.0063
2	0.4	0.8	0.75	0.600	0.026	0.021	0.302	0.0063
3	0.8	0.2	0.76	0.152	0.020	0.019	0.304	0.0058
3	0.8	0.8	0.76	0.608	0.018	0.019	0.304	0.0058

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
4	1.2	0.2	0.76	0.152	0.014	0.018	0.306	0.0055
4	1.2	0.8	0.76	0.608	0.025	0.018	0.306	0.0055
5	1.6	0.2	0.77	0.154	0.009	0.019	0.314	0.0060
5	1.6	0.8	0.77	0.616	0.024	0.019	0.314	0.0060
6	2.0	0.2	0.80	0.160	0.021	0.018	0.322	0.0058
6	2.0	0.8	0.80	0.640	0.022	0.018	0.322	0.0058
7	2.4	0.2	0.81	0.162	0.014	0.016	0.334	0.0053
7	2.4	0.8	0.81	0.648	0.016	0.016	0.334	0.0053
8	2.8	0.2	0.86	0.172	0.017	0.015	0.352	0.0053
8	2.8	0.8	0.86	0.688	0.016	0.015	0.352	0.0053
9	3.2	0.2	0.90	0.180	0.014	0.013	0.372	0.0048
9	3.2	0.8	0.90	0.720	0.013	0.013	0.372	0.0048
10	3.6	0.2	0.96	0.192	0.012	0.014	0.392	0.0055
10	3.6	0.8	0.96	0.768	0.014	0.014	0.392	0.0055
11	4.0	0.2	1.00	0.200	0.017	0.011	0.400	0.0044
11	4.0	0.8	1.00	0.800	0.012	0.011	0.400	0.0044
12	4.4	0.2	1.00	0.200	0.015	0.006	0.406	0.0024
12	4.4	0.8	1.00	0.800	0.000	0.006	0.406	0.0024
13	4.8	0.2	1.03	0.206	0.010	0.007	0.438	0.0031
13	4.8	0.8	1.03	0.824	-0.001	0.007	0.438	0.0031
14	5.2	0.2	1.16	0.232	0.008	0.010	0.468	0.0047
14	5.2	0.8	1.16	0.928	0.013	0.010	0.468	0.0047
15	5.6	0.2	1.18	0.236	0.008	0.008	0.476	0.0038
15	5.6	0.8	1.18	0.944	0.011	0.008	0.476	0.0038
16	6.0	0.2	1.20	0.240	0.009	0.007	0.464	0.0032
16	6.0	0.8	1.20	0.960	0.006	0.007	0.464	0.0032
17	6.4	0.2	1.12	0.224	0.009	0.005	0.448	0.0022
17	6.4	0.8	1.12	0.896	0.004	0.005	0.448	0.0022
18	6.8	0.2	1.12	0.224	0.008	0.003	0.450	0.0014
18	6.8	0.8	1.12	0.896	-0.002	0.003	0.450	0.0014
19	7.2	0.2	1.13	0.226	0.003	0.002	0.450	0.0009
19	7.2	0.8	1.13	0.904	0.004	0.002	0.450	0.0009
20	7.6	0.0	1.12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000
Valores Medios:			0.959			0.011	7.291	

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Datos de campo para la sección 2-2

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0.0	Ninguno	0.00	0.000	0.000	0.074	0.008	0.0006
1	0.2	0.6	0.08	0.048	0.147	0.134	0.033	0.0044
2	0.4	0.6	0.25	0.150	0.122	0.123	0.065	0.0080
3	0.6	0.6	0.40	0.240	0.124	0.114	0.092	0.0105
4	0.8	0.6	0.52	0.312	0.104	0.109	0.112	0.0122
5	1.0	0.2/0.8	0.60	0.120	0.121	0.108	0.130	0.0140
5	1.0	0.2/0.8	0.60	0.480	0.106	0.108	0.130	0.0140
6	1.2	0.2/0.8	0.70	0.140	0.131	0.096	0.138	0.0132
6	1.2	0.2/0.8	0.70	0.560	0.073	0.096	0.138	0.0132

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
7	1.4	0.2/0.8	0.68	0.136	0.103	0.070	0.136	0.0095
7	1.4	0.2/0.8	0.68	0.544	0.077	0.070	0.136	0.0095
8	1.6	0.2/0.8	0.68	0.136	0.101	0.022	0.118	0.0026
8	1.6	0.2/0.8	0.68	0.544	-0.002	0.022	0.118	0.0026
9	1.8	0.60	0.50	0.30	-0.006	0.036	0.076	0.0027
10	2	0.60	0.3	0.156	0.079	0.071	0.082	0.0058
11	2.2	0.6	0.56	0.336	0.064	0.032	0.118	0.0038
12	2.4	Ninguno	0.62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000
Valores Medios:			0.462			0.079	1.108	

Fuente: elaboración propia

Tabla 15. Datos de campo para la sección 3-3

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0	Ninguno	0.20	0.0	0.000	0.007	0.080	0.0010
1	0.4	0.6	0.20	0.6	0.014	0.031	0.088	0.0027
2	0.8	0.6	0.24	0.6	0.048	0.055	0.100	0.0055
3	1.2	0.6	0.26	0.6	0.062	0.093	0.108	0.0100
4	1.6	0.6	0.28	0.6	0.124	0.113	0.120	0.0136
5	2	0.6	0.32	0.6	0.102	0.180	0.140	0.0252
6	2.4	0.6	0.38	0.6	0.258	0.149	0.172	0.0256
7	2.8	0.6	0.48	0.6	0.040	-0.018	0.188	-0.0034
8	3.2	0.6	0.46	0.6	-0.077	0.005	0.172	0.0009
9	3.6	0.6	0.40	0.6	0.086	0.043	0.140	0.0060
10	4	Ninguno	0.30	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0000
Valores Medios:			0.327			0.066	1.308	

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Datos de campo para la sección 4-4

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0.0	Ninguno	0.28	0.000	0.000	0.013	0.013	0.088
1	0.4	0.60	0.16	0.096	0.025	0.072	0.072	0.072
2	0.8	0.60	0.20	0.120	0.119	0.083	0.083	0.104
3	1.2	0.60	0.32	0.192	0.047	0.104	0.104	0.090
4	1.6	0.60	0.13	0.078	0.160	0.143	0.143	0.106
5	2.0	0.60	0.40	0.240	0.126	0.142	0.142	0.144
6	2.4	0.60	0.32	0.192	0.157	0.095	0.095	0.224
7	3.2	0.60	0.24	0.144	0.032	0.062	0.062	0.128
8	3.6	0.60	0.40	0.240	0.091	0.045	0.045	0.148
9	4.0	0.60	0.34	0.204	-0.002	-0.005	-0.005	0.124
10	4.4	0.60	0.28	0.16	-0.009	0.018	0.018	0.136
11	4.8	0.60	0.40	0.240	0.045	0.065	0.065	0.146
12	5.2	0.60	0.33	0.19	0.084	0.118	0.118	0.138
13	5.6	0.60	0.36	0.216	0.152	0.136	0.136	0.132

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
14	6.0	0.60	0.30	0.180	0.121	0.060	0.060	0.104
15	6.4	0.60	0.22	0.132	0.000	0.000	0.000	0.088
16	6.8	Ninguno	0.22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Valores Medios:			0.29			0.075	1.972	

Fuente: elaboración propia

Tabla 17. Datos de campo para la sección 5-5

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0	Ninguno	0.06	0.000	0.000	0.019	0.012	0.000
1	0.4	0.60	0.06	0.036	0.019	0.019	0.024	0.000
2	0.8	0.60	0.10	0.06	0.062	0.062	0.040	0.002
3	1.2	0.60	0.16	0.096	0.012	0.012	0.064	0.001
4	1.6	0.60	0.40	0.240	0.042	0.042	0.160	0.007
5	2	0.60	0.40	0.240	0.110	0.100	0.160	0.016
6	2.4	0.60	0.38	0.228	0.173	0.173	0.152	0.026
7	2.8	0.60	0.36	0.216	0.201	0.201	0.144	0.029
8	3.2	0.60	0.27	0.160	0.165	0.165	0.108	0.018
9	3.6	0.60	0.28	0.160	0.107	0.107	0.112	0.012
10	4.00	0.60	0.28	0.16	0.104	0.104	0.112	0.012
11	4.4	0.60	0.30	0.18	0.214	0.214	0.120	0.026
12	4.80	0.60	0.52	0.312	0.087	0.087	0.208	0.018
13	5.2	0.60	0.28	0.160	0.075	0.075	0.112	0.008
14	5.6	0.60	0.60	0.360	0.062	0.062	0.420	0.026
15	6.6	0.60	0.78	0.468	0.255	0.255	0.780	0.199
16	7.6	Ninguno	0.66	0.000	0.000	0.255	0.330	0.084
Valores Medios:			0.402			0.159	3.058	

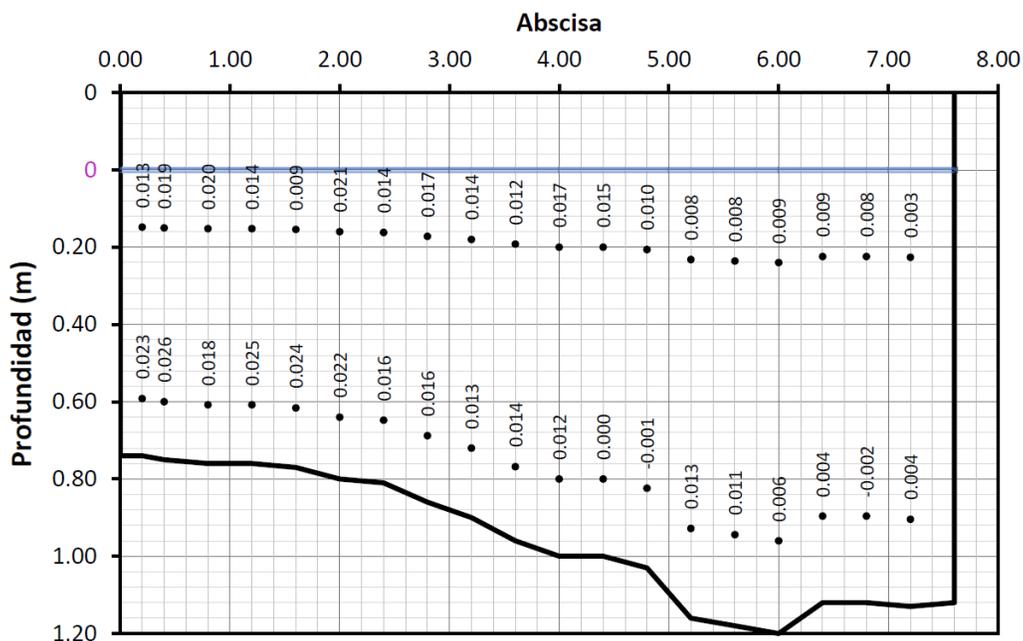
Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 1-1

Estación de aforo - Río Lindo 1 – Sección 1-1	
Parámetros	
Prof. media (m)	0.959
Velocidad media (m/s)	0.011
Temperatura media (°C)	23.241
Ancho total (m)	7.60
Área total (m ²)	7.291
Caudal total (m ³ /s)	0.080



Sección Transversal & Velocidades medidas



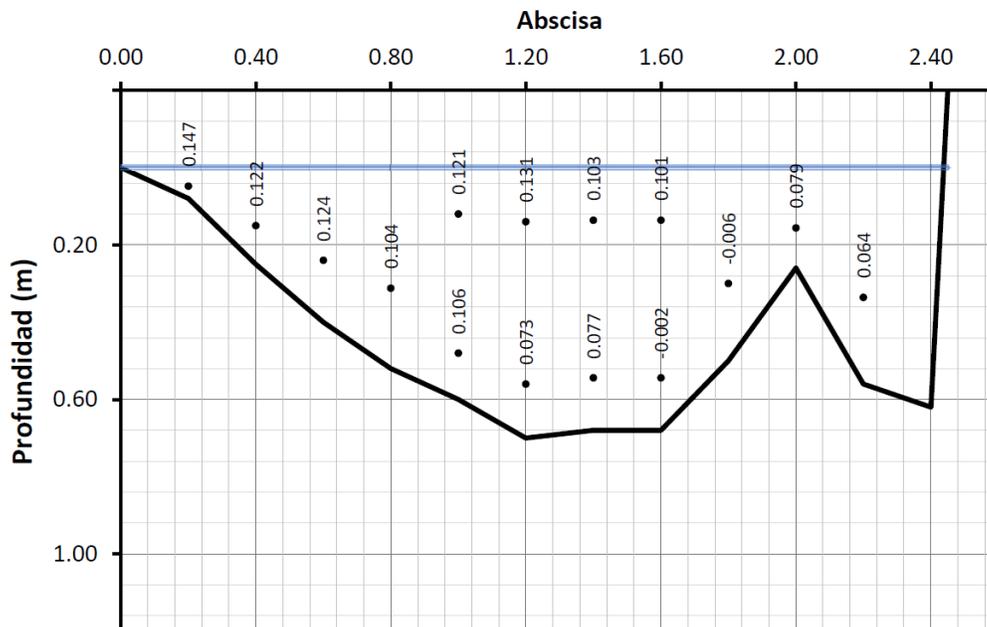
Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 2-2

Estación de aforo - Río Lindo 1 – Sección 2-2	
Parámetros	
Prof. media (m)	0.462
Velocidad media (m/s)	0.079
Temperatura media (°C)	23.239
Ancho total (m)	2.4
Área total (m ²)	1.108
Caudal total (m ³ /s)	0.087



Sección Transversal & Velocidades medidas



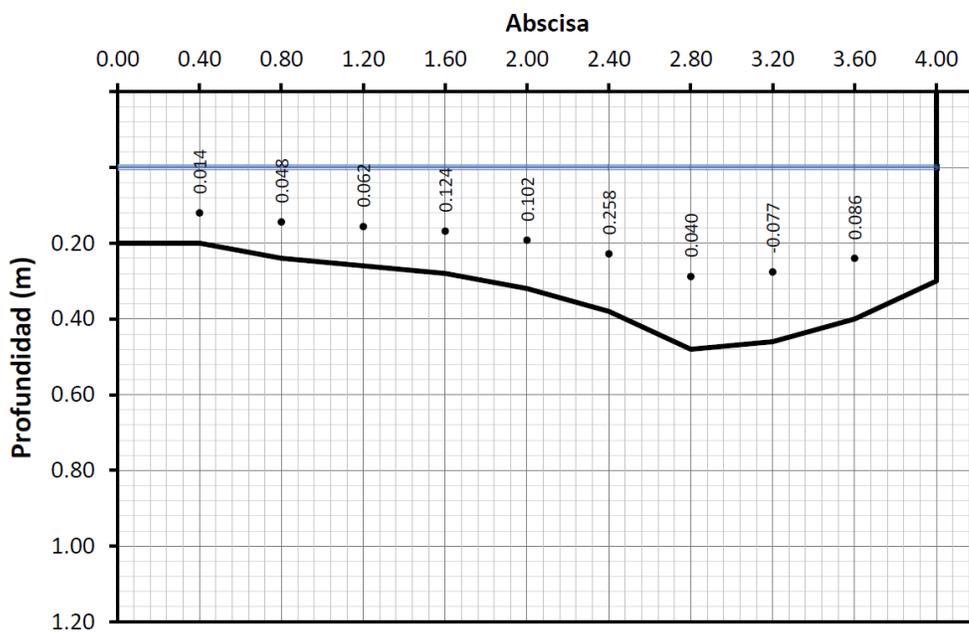
Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Sección transversal del tramo Río Lindo 1 – sección 3-3

Estación de aforo - Río Lindo 1 – Sección 3-3	
Parámetros	
Prof. media (m)	0.327
Velocidad media (m/s)	0.066
Temperatura media (°C)	23.501
Ancho total (m)	4.0
Área total (m ²)	1.308
Caudal total (m ³ /s)	0.087



Sección Transversal & Velocidades medidas



Fuente: elaboración propia

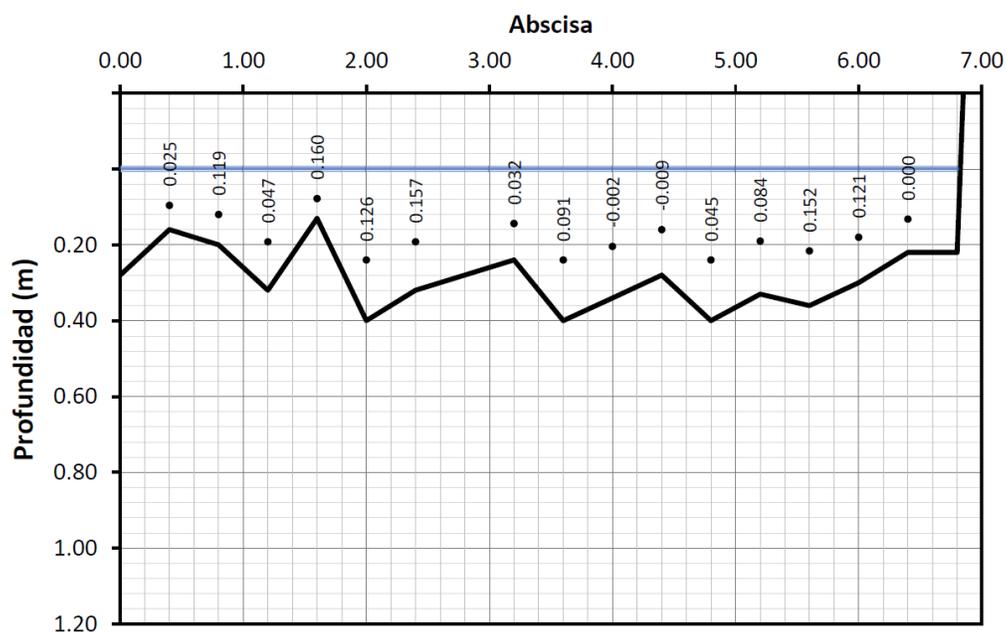
Tabla 21. Sección transversal de la Quebrada Pilama – sección 4-4

Estación de aforo – Q. La Pilama – Sección 4-4

Parámetros	
Prof. media (m)	0.290
Velocidad media (m/s)	0.075
Temperatura media (°C)	25.002
Ancho total (m)	6.80
Área total (m ²)	1.972
Caudal total (m ³ /s)	0.147



Sección Transversal & Velocidades medidas



Fuente: elaboración propia

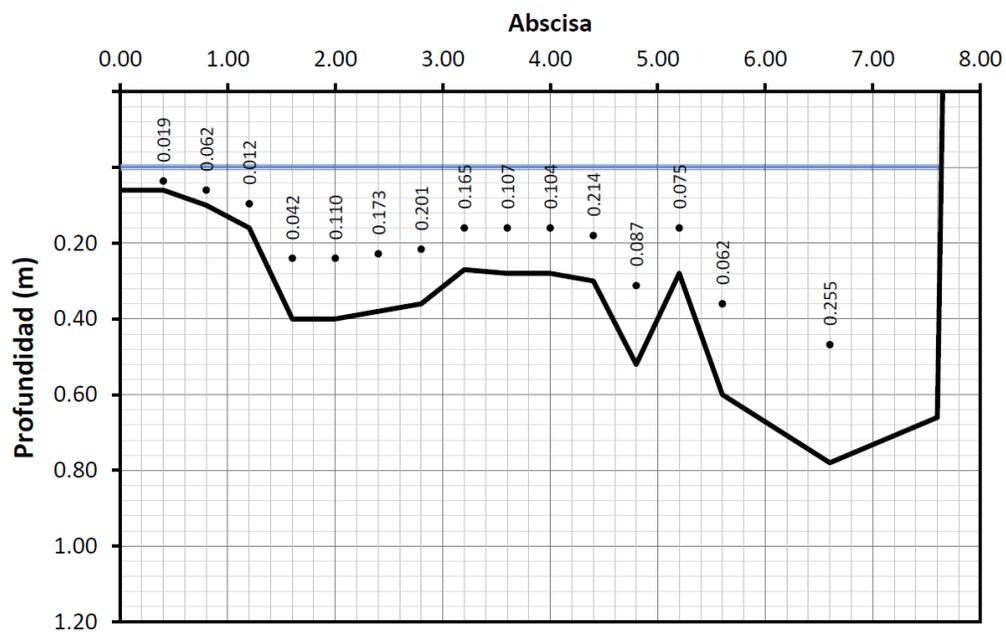
Tabla 22. Sección transversal tramo Río Lindo 2 – sección 5-5

Estación de aforo - Río Lindo 2 – Sección 5-5

Parámetros	
Prof. media (m)	0.402
Velocidad media (m/s)	0.159
Temp. media (°C)	24.446
Ancho total (m)	7.6
Área total (m ²)	3.058
Caudal total (m ³ /s)	0.486



Sección Transversal & Velocidades medidas



Fuente: elaboración propia

4.3 Método volumétrico para las descargas

Se realizaron los aforos en las cinco más grandes descargas mediante el método volumétrico, dado que eran las que presentaban continuidad en el flujo, las demás eran descargas con comportamiento intermitente. Las mediciones se realizaron con probeta calibrada en el que se determinó el volumen y se midió el tiempo con un cronometro; este método solo es recomendable para caudales pequeños y donde las características físicas lo permitan.

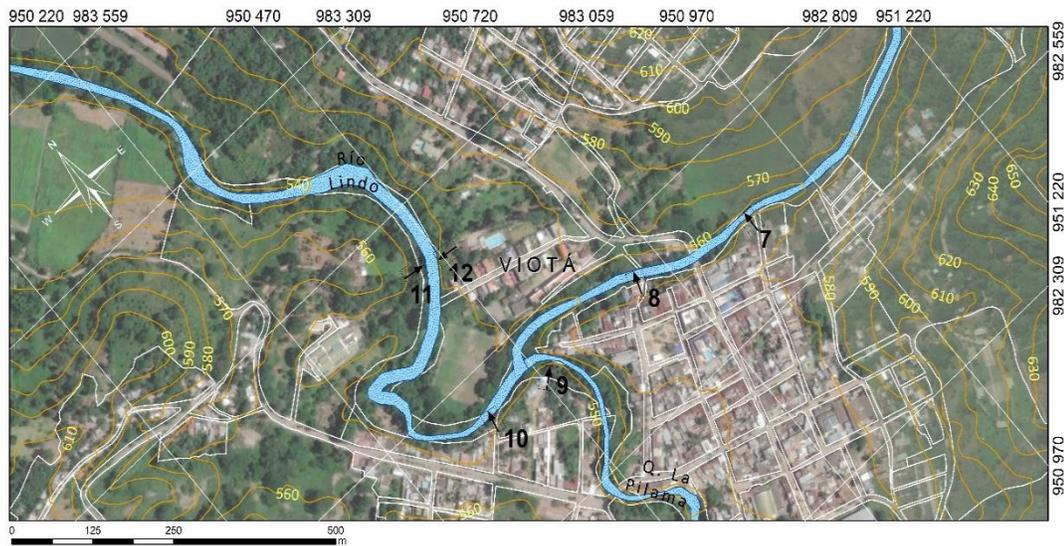


Figura 25. Ubicación de descargas principales sobre río Lindo – Viotá. Fuente: elaboración propia

A continuación, en las siguientes tablas se indica las coordenadas exactas de los puntos de descarga de aguas residuales, dimensiones, material del tubo, caudal, descripción del lugar y su respectiva fotografía.

Tabla 23. Descarga No. 7 – sector Cogoyo

Punto de descarga No. 7, margen izquierda río Lindo 1	
Coordenadas	
Este	Norte
950859	982697
Dimensiones	
Diámetro	4"
Material	
Gres	
Caudal	
0.0326	L/s
Descripción	
Sector Cogoyo	



Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Descarga No. 8 – Carrera 12, puente peatonal

Punto de descarga No 8, margen izquierda río Lindo 1	
Coordenadas	
Este	Norte
950675	982748
Dimensiones	
18 cm	8 cm
Material	
Concreto	
Caudal	
0.7167	L/s
Descripción	
Carrera 12, puente peatonal	



Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Descarga No. 10 – Sector matadero

Punto de descarga No 10, margen izquierda río Lindo 2	
Coordenadas	
Este	Norte
950375	982749
Dimensiones	
Diámetro	12"
Material	
PVC	
Caudal	
1.3017	L/s
Descripción	
Sector Matadero	



Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Descarga No. 11 – Vertimiento del Hospital

Punto de descarga No 11, margen izquierda río Lindo 2	
Coordenadas	
Este	Norte
950446	982968
Dimensiones	
Diámetro	6"
Material	
GRES	
Caudal	
0.0915	L/s
Descripción	
Vertimiento Hospital	



Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Descarga No. 12 – Vertimiento piscinas y recreación Camoa

Punto de descarga No 12, margen derecha río Lindo 2	
Coordenadas	
Este	Norte
950464	982963
Dimensiones	
Diámetro	8"
Material	
Concreto	
Caudal	
0.6831	L/s
Descripción	
Vertimiento sector Piscina Camoa	



Fuente: elaboración propia

4.4 Conductividad

Los trazadores son herramientas descriptivas de cuerpos de agua, su principal objetivo es determinar caudales, tiempos de viaje y estudiar patrones de mezcla aguas abajo de las descargas. Para esta actividad en campo se usó sal común (NaCl) por ser el más usado, económico, soluble al agua y su concentración es detectada fácilmente, además no contamina el medio durante periodo prolongado, ni afecta a seres vivos.

Los pasos que se llevaron a cabo fue la dilución de la sal, el vertimiento constante de la solución a la corriente de agua y su detección “in situ” con las sondas. Se utilizaron dos puntos de mezcla, uno en la zona de la piscina y otra agua abajo de la confluencia del río Lindo y la quebrada Pilama

Para la medición se ubicaron dos sondas aguas abajo de la inyección de la mezcla y de acuerdo con las recomendaciones, la lectura de los valores debe ser de forma inmediata y estas mediciones se registraron en el equipo, pero de la misma manera se transcribió en el formato de campo. Ver Fotografía 9.

En la figura 26 se puede observar los puntos de control donde se ejecutó el método de dilución con trazadores en el río de estudio como son los puntos de mezcla y vertimiento y las ubicaciones de las sondas.

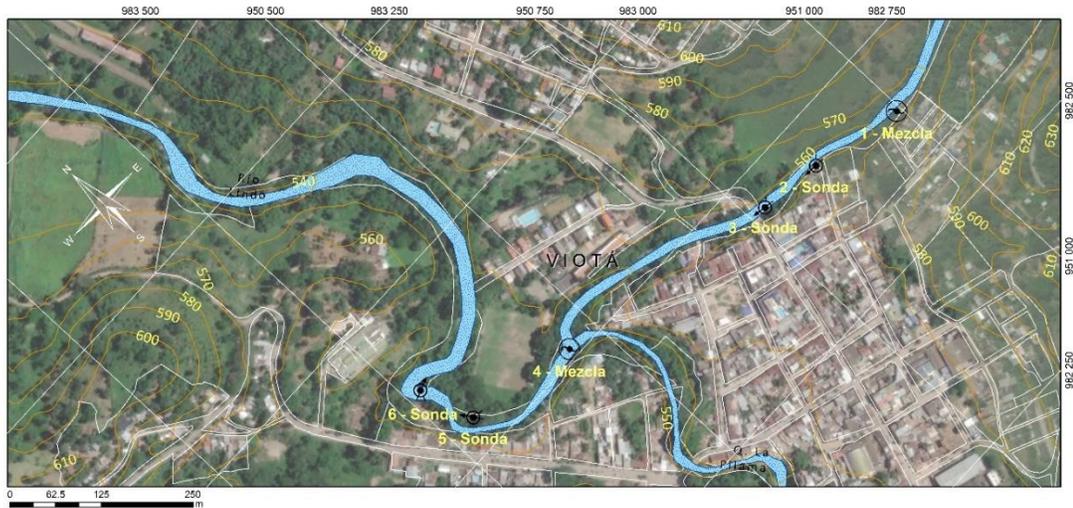


Figura 26. Ubicación puntos de control de Conductividad. Fuente: elaboración propia



Fotografía 9. Ubicación de la sonda en el río Lindo. Fuente: elaboración propia

4.4.1 Calibración equipos de medición para el trazador

Dado que el valor registrado en campo de los equipos utilizados es de conductividad, previamente se realizó el ajuste de los valores de concentración del soluto (NaCl) con los valores reportados de las sondas, de tal forma que se correlaciona conductividad y concentración. Por lo general, esta calibración es una línea recta para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

4.4.1.1 Calibración sonda 1 – agua destilada – agua río Lindo

Calibración para agua destilada: En el laboratorio se realizó el ensayo en un recipiente de 2.0 litros y con agua destilada para la incorporación del soluto.

Tabla 28. Datos de correlación sonda 1 – agua destilada

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad $\mu\text{s/cm}$
0.00	0	0	0.57
0.01	10	5	12.7
0.02	20	10	24.2
0.03	30.2	15.1	34.9
0.04	40.4	20.2	46.1
0.05	50.6	25.3	57.5
0.06	60.6	30.3	68.8
0.07	70.9	35.45	79.1
0.08	80.9	40.45	81.9
0.09	91.0	45.5	92.9
0.10	101.1	50.55	103.5

Fuente: elaboración propia

Al realizar la correlación entre las dos variables se obtiene los siguientes coeficientes al realizar un análisis de mínimos cuadrados de un polinomio de grado uno:

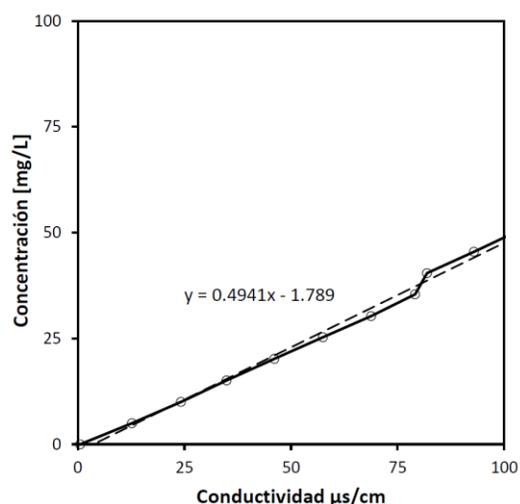


Figura 27. Curva de calibración sonda 1 -agua destilada. Fuente: elaboración propia

Calibración para agua de río Lindo: En campo se realizó un ensayo en un recipiente de 2.0 litros y con agua del río Lindo para la incorporación del soluto.

Tabla 29. Datos de correlación sonda 1 – agua río Lindo

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad µs/cm
0.00	0.0	0.00	194.5
0.01	10.0	5.00	207.3
0.02	20.1	10.05	218.8
0.03	30.1	15.05	229.0
0.04	40.1	20.05	242.0
0.05	50.3	25.15	252.0
0.06	60.3	30.15	263.0
0.07	70.3	35.15	274.0
0.08	80.3	40.15	284.0
0.09	90.3	45.15	295.0
0.10	100.3	50.15	305.0

Fuente: elaboración propia

Al realizar la correlación entre las dos variables se obtiene los siguientes coeficientes al realizar un análisis de mínimos cuadrados de un polinomio de grado uno:

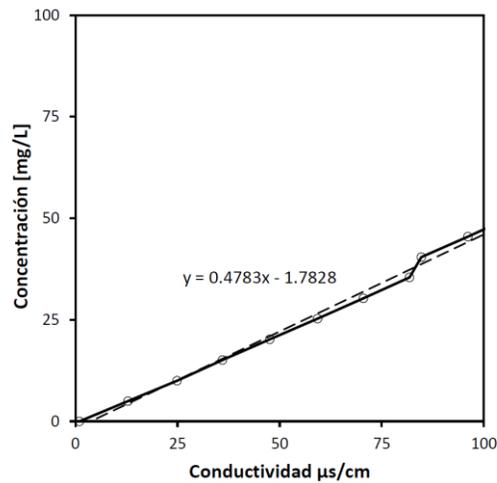


Figura 28. Curva de calibración sonda 1 – agua río Lindo. Fuente: elaboración propia

4.4.1.2 Calibración sonda 2 – agua destilada – agua del río Lindo

Calibración para agua destilada: En el laboratorio se realizó el ensayo en un recipiente de 2.0 litros y con agua destilada para la incorporación del soluto.

Tabla 30. Datos de correlación sonda 2 – agua destilada

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad $\mu\text{s/cm}$
0.00	0.0	0.0	0.99
0.01	10.0	5.0	12.88
0.02	20.0	10.0	24.9
0.03	30.2	15.1	36.0
0.04	40.4	20.2	47.6
0.05	50.6	25.3	59.3
0.06	60.6	30.3	70.5
0.07	70.9	35.45	81.8
0.08	80.9	40.45	84.7
0.09	91.0	45.5	96.1
0.10	101.1	50.55	107.1

Fuente: elaboración propia

Al realizar la correlación entre las dos variables se obtiene los siguientes coeficientes al realizar un análisis de mínimos cuadrados de un polinomio de grado uno:

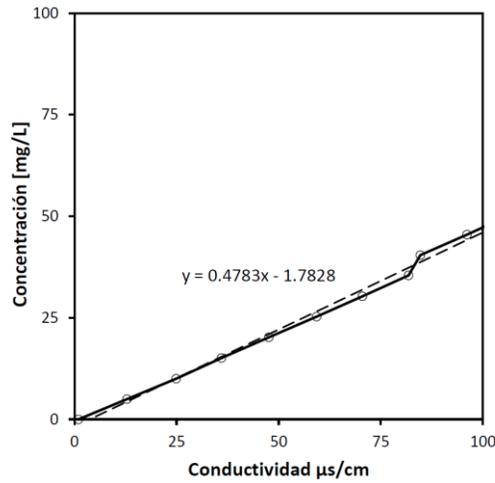


Figura 29. Curva de calibración sonda 1 - agua destilada. Fuente: elaboración propia

Calibración para agua de río Lindo: En campo se realizó el ensayo en un recipiente de 2.0 litros y con agua del río Lindo la incorporación del soluto.

Tabla 31. Datos de correlación sonda 2 – agua río Lindo

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad µs/cm
0.00	0.0	0.00	194.5
0.01	10.0	5.00	207.3
0.02	20.1	10.05	218.8
0.03	30.1	15.05	229.0
0.04	40.1	20.05	242.0
0.05	50.3	25.15	252.0
0.06	60.3	30.15	263.0
0.07	70.3	35.15	274.0
0.08	80.3	40.15	284.0
0.09	90.3	45.15	295.0
0.10	100.3	50.15	305.0

Fuente: elaboración propia

Al realizar la correlación entre las dos variables se obtiene el siguiente coeficiente al realizar un análisis de mínimos cuadrados de un polinomio de grado uno:

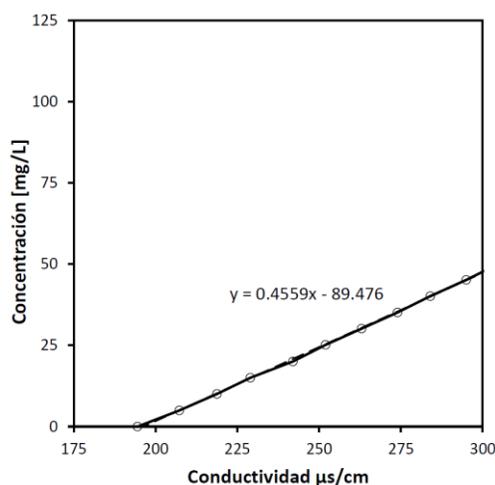


Figura 30. Curva de calibración sonda 2 – agua río Lindo. Fuente: elaboración propia

Es importante resaltar que los valores de las curvas de calibración se deben aplicar el correspondiente a los datos de la concentración del agua de río Lindo, para no disfrazar los valores del soluto que son los que se van a incorporar en el modelo matemático de calidad.

4.4.2 Valores del trazador

Una vez obtenidas las curvas de ajuste para cada una de las sondas, se realiza el cambio de variable de conductividad a concentración quedando de la siguiente forma.

4.4.2.1 Tramo 2-3

Los datos obtenidos se normalizan con una media móvil de una ventana de un minuto hacia adelante, de tal forma que se uniformicen los datos, así mismo se normaliza a ceros la serie y se trabaja con una ventana de 15 segundos, de tal forma que las dos series la del punto 2 y la del punto 3 se normalizan con los mismos valores de tiempo, de acuerdo con los ajustes anteriores los valores de concentración que se tienen para el tramo analizado entre los puntos 2 y 3 son:

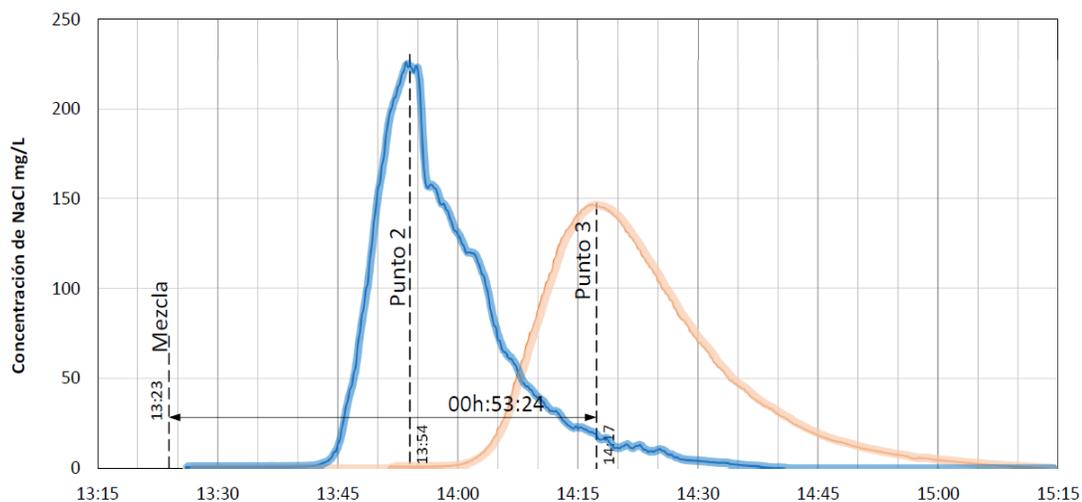


Figura 31. Normalización de valores del trazador 2-3. Fuente: elaboración propia

Obteniéndose el máximo a las 13:54 con un valor de 226.05 mg/L para el punto 2 y para el punto 3 un máximo a las 14:17 con un valor de 146.57 mg/L. Con esta serie se procede a realizar el análisis del coeficiente de dispersión longitudinal para este tramo.

4.4.2.2 Tramo 5-6

Los valores de concentración se tienen para el tramo analizado entre los puntos 4 y 6 son:

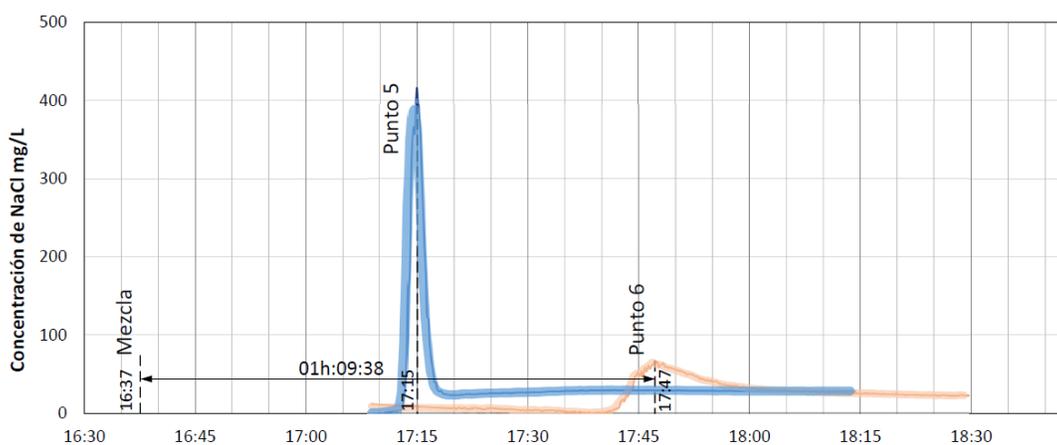


Figura 32. Normalización de valores del trazador 5-6. Fuente: elaboración propia

Obteniéndose el máximo a las 17:15 con un valor de 416 mg/L para el punto 5 y para el punto 6 un máximo a las 17.47 con un valor de 66.9 mg/L. Con esta serie se procede a realizar el análisis del coeficiente de dispersión longitudinal para este tramo.

4.4.3 Coeficiente de dispersión longitudinal

Para la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal CDL, se utilizó el modelo de Zona Muerta Agregada (ADZ en inglés), debido que este modelo permite a partir de dos parámetros realizar el análisis.

4.4.3.1 Resultados tramo 1-2-3

Con los cálculos realizado se obtuvieron los siguientes parámetros:

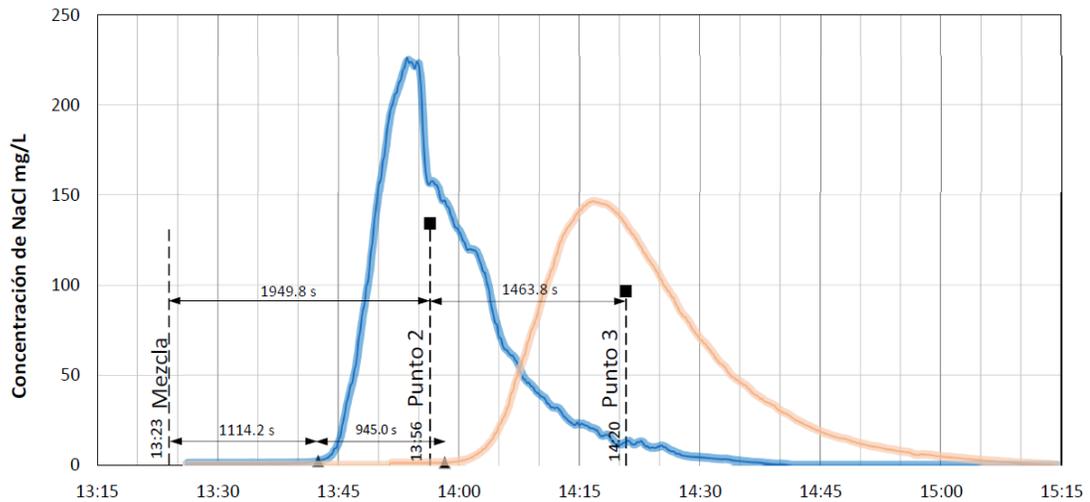


Figura 33. Parámetros del tramo 1-2-3 CDL. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Resultados del análisis de CDL- tramo 1-2-3.

	1	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Hora de Inyección	13:23:56			
Soluto inyectado [kg]	18			
Máximos [mg/L]			226.05	146.57
Hora al pico			13:53:30	14:16:45
Tiempo al pico [s]			1774.2	3169.2

	1	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Áreas Bajo la curva [s mg/L]			201337	207218
Caudales [m ³ /s]			0.0894	0.0869
SSG Ganancia A ₂ /A ₁				1.03
Centroide X [s]			1949.8 s	3413.6 s
Centroide Y [mg/L]			134.03	96.49
Tiempo de Viaje [s]			1949.8	1463.8
Varianza			291396	487701
Primer Arribo (1%) [mg/L]			2.26	1.47
Hora Arribo			13:42:30	13:58:15
Tiempo de Retraso [s]			1114.2	945.0
DF			0.43	0.35
Longitud Tramo [m]			139.7	93.1
Velocidad media de Viaje [m/s]			0.072	0.064
Velocidad al pico [m/s]			0.079	0.067
Velocidad máxima [m/s]			0.125	0.099
Caudal Observado			0.080	0.087
Área media de sección [m ²]			1.117	1.368
Área Medida Campo [m ²]			1.108	1.308
Cte. Dispersión Long. [m ² /s]			0.38	0.27

Fuente: elaboración propia

2.1.1.1. Resultados tramo 4-5-6

Con los cálculos realizado se obtuvieron los siguientes parámetros:

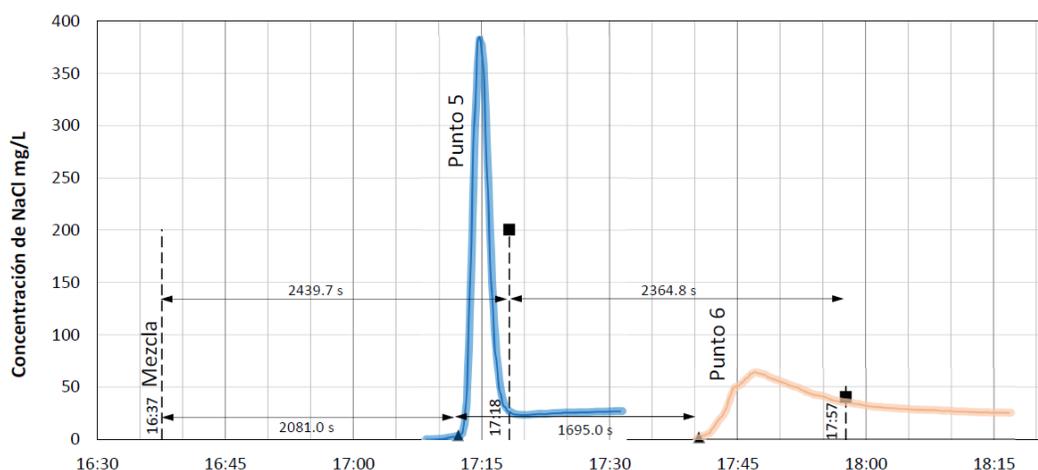


Figura 34. Parámetros del tramo 4-5-6 CDL. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Resultados del análisis de CDL- tramo 4-5-6.

	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Hora de Inyección	16:37:34		
Soluto inyectado [kg]	18		
Máximos [mg/L]		384.60	63.76
Hora al pico		17:14:45	17:47:00
Tiempo al pico [s]		2231.0	4166.0
Áreas Bajo la curva [s mg/L]		74634	75915
Caudales [m ³ /s]		0.2412	0.2371
SSG Ganancia A ₂ /A ₁			1.017
Centroide X [s]		2439.7	4804.5
Centroide Y [mg/L]		200.54	40.13
Tiempo de Viaje [s]		2439.7	2364.8
Varianza		86619	336042
Primer Arribo (1%) [mg/L]		3.85	1.91
Hora Arribo		17:12:15	17:40:30
Tiempo de Retraso [s]		2081.0	1695.0
DF		0.15	0.28

	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Longitud Tramo [m]		184.6	100.8
Velocidad media de Viaje [m/s]		0.076	0.043
Velocidad al pico [m/s]		0.083	0.052
Velocidad máxima [m/s]		0.089	0.059
Caudal Observado		0.234	0.234
Área media de sección [m ²]		3.093	5.490
Área Medida Campo [m ²]		1.108	1.308
Cte. Dispersión Long. [m ² /s]		0.10	0.10

Fuente: elaboración propia

4.5 Plan de muestreo

En campo, antes de iniciar la toma de muestra, el grupo de trabajo se equipó de acuerdo con sus artículos de dotación como el overol, botas y también de los materiales necesarios para cada una de las diferentes actividades.

4.5.1 Diseño de la red de monitoreo

La red de monitoreo del río Lindo se ha diseñado tomando en cuenta los lugares de fácil acceso para poder tomar las muestras, la seguridad del personal y de las descargas influentes que vierten en el cauce principal. Se localizó los siguientes puntos de muestreo: en la piscina municipal, antes y después de la confluencia de la quebrada Pilama y el río Lindo, en el sector el matadero, en la zona de Piscinas y recreación Camoa y en el sector San Antonio.

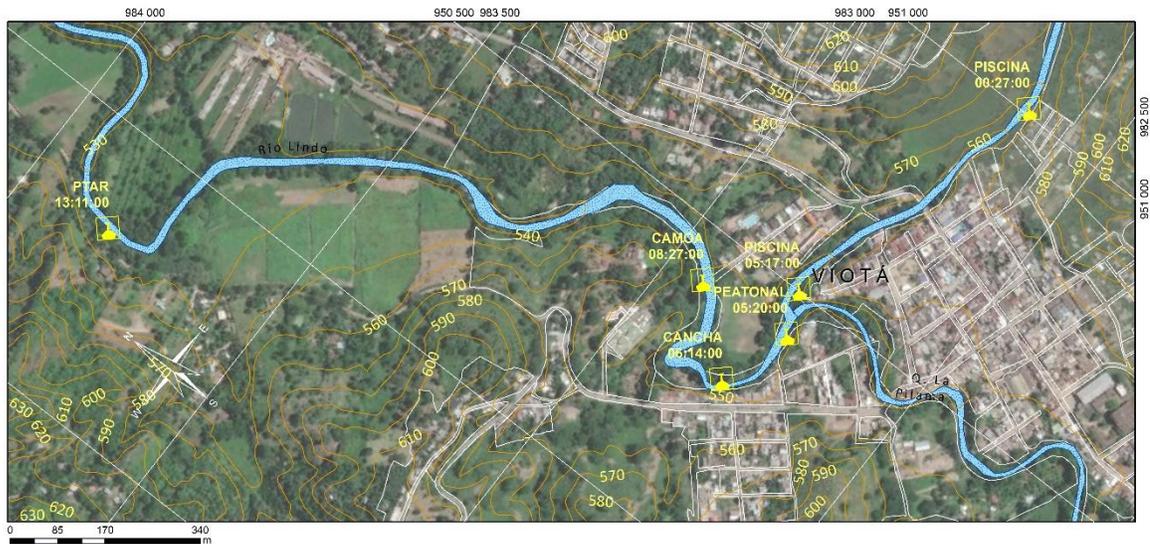


Figura 35. Estaciones de muestreo de la red monitoreo. Fuente: elaboración propia

4.5.2 Muestreo

Conocido los valores de velocidad de mezcla, se procedió a identificar para cada punto del río Lindo la hora que se debía tomar las muestras para lograr la misma masa de agua, se inició la toma a las 00:27 y se terminaron de tomar las muestras a las 13:11. Ver figura 35.

El tipo de muestra que se tomó para esta campaña de calidad de agua es puntual, es decir, en un lugar representativo en el medio de la sección del río Lindo donde se evidencia que la corriente es homogénea y en un tiempo determinado para poder tomar la misma masa desde el punto inicial en la piscina municipal hasta punto final aguas abajo del municipio de Viotá.

En cada ubicación se llenó dos botellas de Winkler y un frasco de DBO, al tomar las muestras inmediatamente se fijó el oxígeno disuelto a las botellas de Winkler, agregándole 1 ml sulfato manganeso ($MnSO_4$), 1 ml alcalino yoduro nítrico y 1 ml de ácido sulfúrico; al finalizar los recipientes se almacenaron dentro de las neveras de icopor, con el debido cuidado de tal manera que no se rompan o quedaran expuestos a la luz directa.

El proceso se repitió para las cinco descargas de aguas residuales y para la quebrada Pilama, que para ese caso no se necesitó que la toma de muestra fuera en un tiempo específico. Ver Fotografía 10 donde se observa la toma de muestra de la descarga 8 en la carrera 12, puente peatonal.



Fotografía 10. Toma de muestra de una descarga de A.R. Fuente: elaboración propia

4.6 Análisis de laboratorio

A continuación, se presenta el procedimiento y los resultados obtenidos de los diferentes métodos empleados para determinar el oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno, ver tabla 34.

Tabla 34. Métodos aplicados en el laboratorio de ambiental de la Escuela

Parámetro	Unidades	Método
DQO	Mg O ₂ / L	Método titulométrico de reflujo cerrado
OD	Mg / L	Método de Winkler

Fuente: elaboración propia

Para el trabajo en el laboratorio, la primera etapa fue la titulación de las 24 botellas de Winkler compuesta por seis (6) muestras del cauce, una (1) de la quebrada Pilama y cinco (5) muestras de descargas de aguas residuales, respectivamente con su respaldo cada uno. Ver fotografía 11.



Fotografía 11. Muestras tomadas en campo para el oxígeno disuelto. Fuente: elaboración propia

“El método se basa en el hecho de que el oxígeno el ion Mn^{++} a un estado superior de valencia en condiciones alcalinas, y en que el manganeso en estados superiores de valencia es capaz de oxidar el ion I^- a yodo libre en condiciones ácidas. La cantidad de yodo liberado se mide con solución estándar de tiosulfato de sodio y es equivalente a la cantidad de oxígeno disuelto originalmente presente en la muestra”. (Romero, enero de 2009)

A continuación, se puede observar en la tabla 35 los mililitros (ml) gastados de tiosulfato de sodio y el oxígeno disuelto obtenido para cada uno de los puntos.

Tabla 35. Oxígeno disuelto obtenido en el laboratorio.

Punto de muestreo	Tiosulfato de sodio		Oxígeno Disuelto	
	Muestra ml	Respaldo ml	Muestra mg/L OD	Respaldo mg/L OD
P.1	7.3	7.45	7.087	7.232
P.2	7.4	7.4	7.184	7.184
P.3	5.9	6.1	5.727	5.922
P.4	6.8	6.8	6.601	6.601
P.5	5.8	5.8	5.630	5.630
P.6	6.3	5.9	6.116	5.727
D.7	2.2	2.5	2.136	2.427
D.8	6.2	6.3	6.019	6.116
Q.9	5.8	5.7	5.630	5.533

Punto de muestreo	Tiosulfato de sodio		Oxígeno Disuelto	
	Muestra ml	Respaldo ml	Muestra mg/L OD	Respaldo mg/L OD
D.10	0.1	0.2	0.097	0.194
D.11	1.1	1.1	1.068	1.068
D.12	1.0	0.9	0.971	0.874

Fuente: elaboración propia

D= Descarga, P= Punto de muestreo, Q= Quebrada Pilama

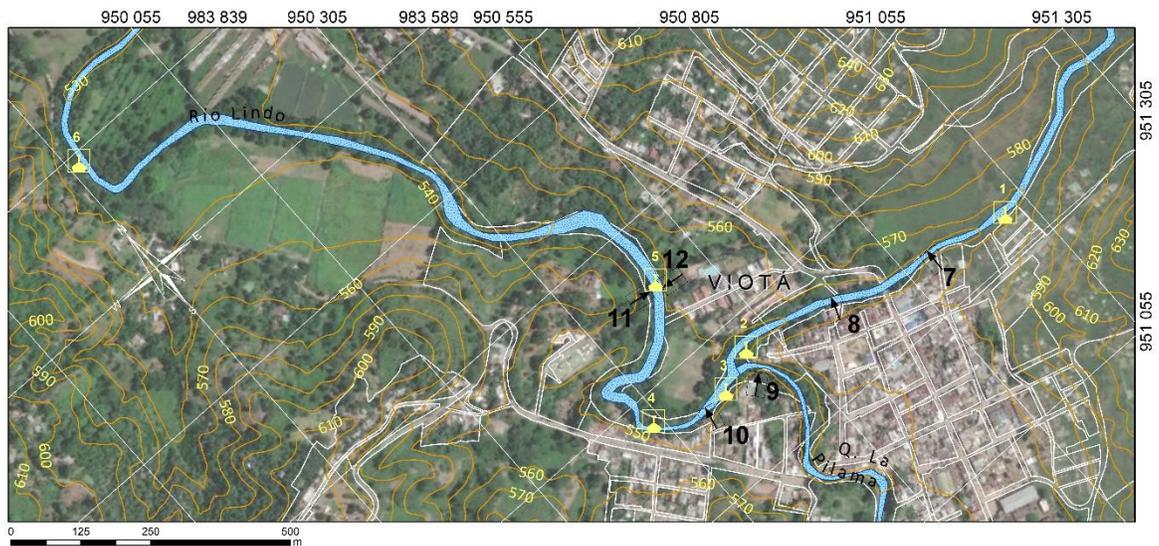


Figura 36. Distribución espacial de las muestras para los ensayos de laboratorio. Fuente: IGAC, elaboración propia

En las siguientes fotografías se muestra la titulación del oxígeno disuelto con el tiosulfato de sodio.



Fotografía 12. Titulación del oxígeno disuelto. Fuente: elaboración propia

El segundo paso realizado en el laboratorio fue la demanda química de oxígeno (DQO), es un parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte.

Paso a paso se ejecutó el método titulométrico de reflujo cerrado, se usó veinticuatro (24) tubos con su respectiva cantidad de muestra, de ácido sulfúrico y de la solución estándar de dicromato de potasio; luego se colocó los tubos en un digestor cerrado por dos (2) horas, se enfrió a temperatura de ambiente y se transfirió el contenido del tubo a un Erlenmeyer para su titulación.



Fotografía 13. Las botellas para el método titulométrico. Fuente: elaboración propia

Este ensayo tiene una ventaja de ser más rápido que el DBO y no está sujeto a tantas variables como al realizar la prueba biológica, con la DQO se puede obtener una DBO estimada o medible en mg/L, con este dato se obtiene los mililitros (ml) de muestra para agregar a cada botella de DBO.

En la tabla 36 se puede observar los datos obtenidos en laboratorio de la DQO y los milímetros de muestra escogida para la siguiente etapa en el laboratorio.

Tabla 36. Datos obtenidos de DQO, DBO₅ y ml de muestra para las botellas DBO.

Punto de muestreo	Muestra [ml]	FAS [ml]	DQO [mg O ₂ / L]	DBO ₅ estimada	Muestra DBO ml
P.1	2.0	1.6	34.286	17.143	20
	2.5	1.65	13.714	6.857	20
P.2	2.0	1.7	-	-	-
	2.5	1.65	13.714	6.857	20
P.3	2.0	1.65	17.143	8.571	20
	2.5	1.6	27.429	13.714	20
P.4	2.0	1.65	17.143	8.571	20
	2.5	1.65	13.714	6.857	20
P.5	2.0	1.7	-	-	-
	2.5	1.65	13.714	6.857	20
P.6	2.0	1.6	51.429	25.714	20
	2.5	1.65	27.429	13.714	20
D.7	0.5	1.25	205.714	102.857	10
	1.0	1.1	205.714	102.857	10
D.8	2.0	1.6	51.429	25.714	20

Punto de muestreo	Muestra [ml]	FAS [ml]	DQO [mg O ₂ / L]	DBO ₅ estimada	Muestra DBO ml
Q.9	2.5	1.65	27.429	13.714	20
	2.0	1.6	51.429	25.714	20
	2.5	1.7	13.714	6.857	20
D.10	0.5	1.4	274.286	137.143	10
	1.0	1.45	102.857	51.429	10
D.11	2.0	1.55	68.571	34.286	20
	2.5	1.55	54.857	27.429	20
D.12	0.5	1.45	205.714	102.857	10
	1.0	1.35	171.429	85.714	10

Fuente: elaboración propia

La tercera etapa realizada fue el llenado de las botellas de Winkler con la muestra respectiva y el agua de dilución; luego se tituló las doce (12) primeras botellas que indica que es el día inicial para determinar la cantidad de oxígeno disuelto en la fecha del 03 de agosto del 2018.



Fotografía 14. Botellas de Winkler para incubación. Fuente: elaboración propia

El resto de las botellas de Winkler se encubaron a 20°C para distintos periodos de tiempo para cinco (5) días, dieciocho (18) días y treinta (30) días, estas fechas fueron 08 de agosto, 21 de agosto y 3 de septiembre respectivamente; en cada fecha se

tituló para determinar la cantidad de oxígeno disuelto y con los datos obtenidos se calcula la DBO.

La DBO se define como la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual mediante la acción de bacterias en condiciones aerobias. La DBO es causada por la respiración de las bacterias y cesara al agotarse totalmente la materia orgánica.



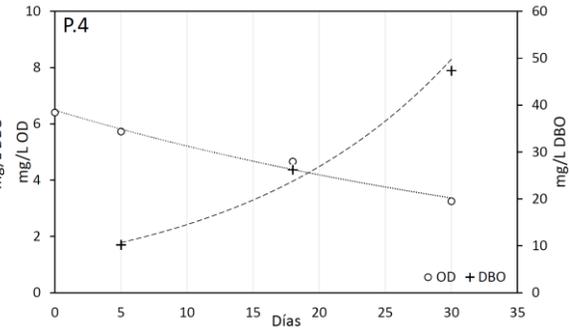
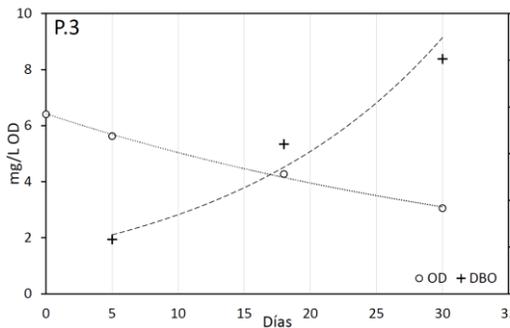
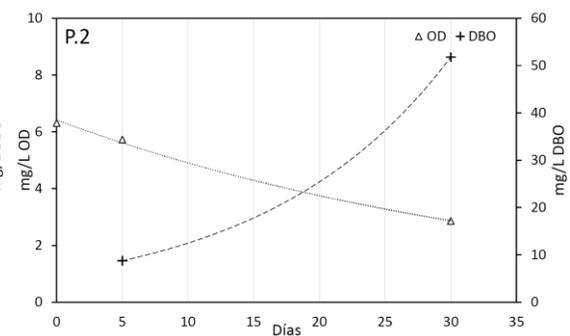
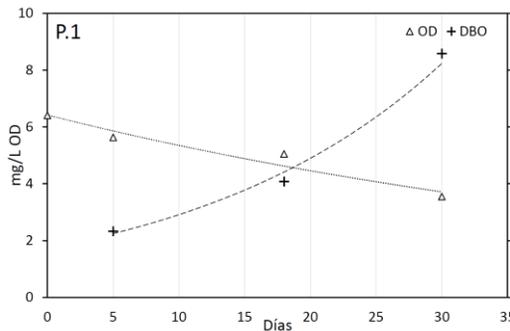
Fotografía 15. Titulación del O.D. de cinco días. Fuente: elaboración propia

A continuación, en la tabla 37 se muestra los datos obtenidos del oxígeno disuelto y los datos de la DBO, para el cálculo de la DBO última de los vertimientos de aguas residuales domesticas se tomó como referencia un K típico aproximadamente 0.17 día^{-1} a 20°C y en base 10.

Tabla 37. Resultados del OD y DBO

Titulación de OD	Oxígeno Disuelto 03-Ago mg/L OD	Oxígeno Disuelto 08 – Ago. mg/L OD	Oxígeno Disuelto 21 – Ago. mg/L OD	Oxígeno Disuelto 03 – Sep. mg/L OD	DBO 5 días mg/L	DBO 18 días mg/L	DBOC 30 días mg/L
P.1	6.407	5.630	5.048	3.547	11.649	20.386	42.905
P.2	6.310	5.727	-	2.857	8.737	-	51.794
P.3	6.407	5.630	4.271	3.054	11.649	32.035	50.294
P.4	6.407	5.727	4.660	3.251	10.193	26.210	47.339
P.5	6.310	5.533	4.465	2.266	11.649	27.667	60.660
P.6	6.407	5.533	2.330	1.478	13.105	61.158	73.938
D.7	6.601	0.000	-	-	198.034	-	230.60
D.8	6.504	5.339	-	-	17.474	-	20.35
Q.9	6.310	5.339	-	-	14.561	-	16.96
D.10	6.407	2.524	-	-	116.491	-	135.65
D.11	6.407	4.465	-	-	29.123	-	33.91
D.12	6.407	3.301	-	-	93.193	-	108.52

Fuente: elaboración propia



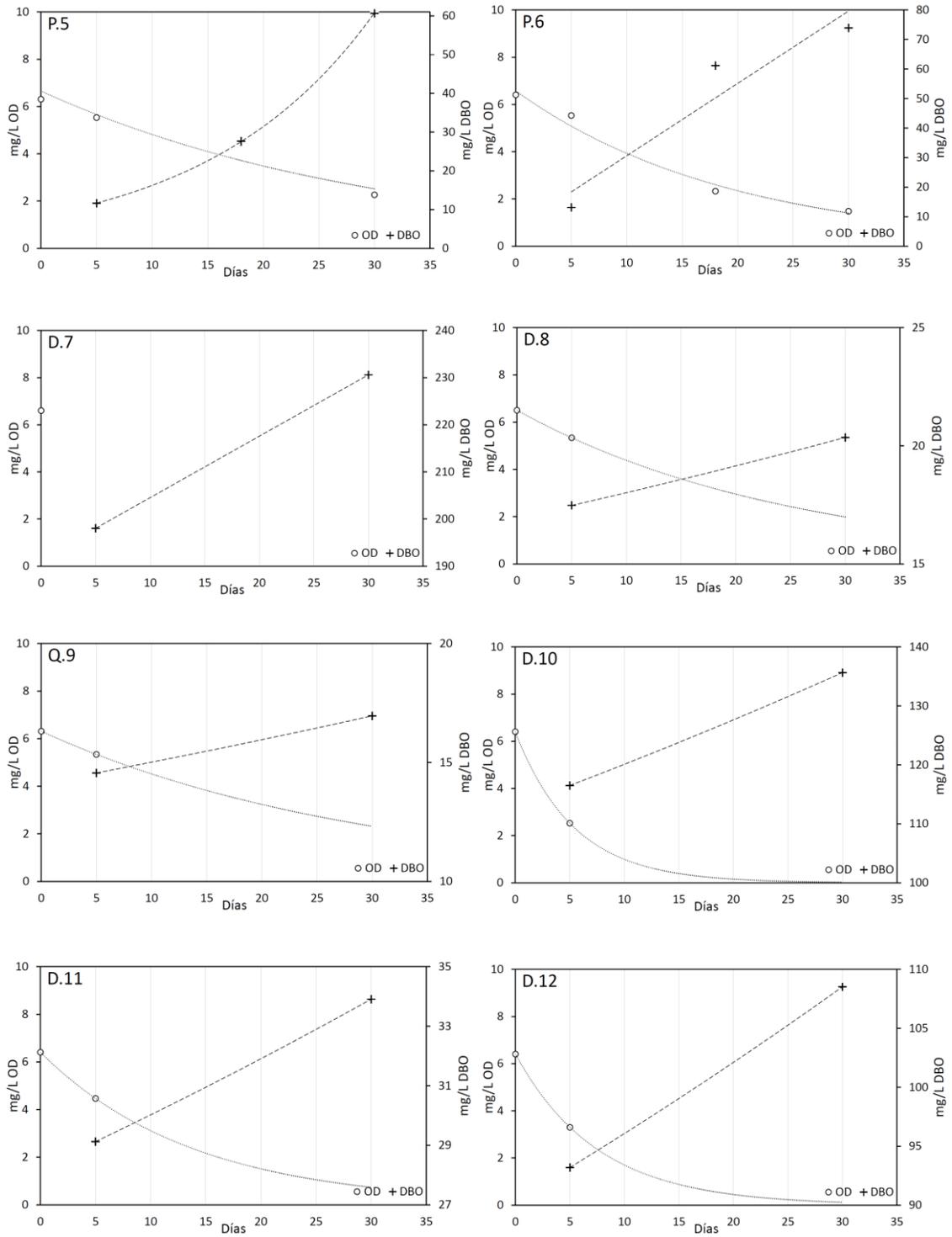


Figura 37. Resultados del OD y DBOC. Fuente: elaboración propia

5 CAPÍTULO Análisis de caudales de la cuenca

Teniendo en cuenta que un primer paso de la modelación es realizar el modelado hidráulico del cauce con los caudales que aporta la cuenca, en condiciones habituales y extremas. Para obtener dichos caudales se utilizará un modelo de lluvia escurrentía, debido a que no se obtuvieron registros de caudal del río Lindo o del río Calandaima. Para distribuir la precipitación registrada en las diferentes estaciones de la región se utilizaron métodos de interpolación geográfica, haciendo uso de la herramienta de sistema de información geográfica ArcGis, utilizando un modelo de terreno y generando archivos tipo ráster²⁴.

El trabajo de campo se realizó teniendo en cuenta que se deben buscar condiciones favorables para el trabajo de campo, razón por la cual se organizó la salida en condición de estiaje. Dado que las condiciones de frontera del modelo requieren de un dato de entrada que corresponde al caudal, se identificaron tres aportes que corresponden a la quebrada La Pilama y el Río Lindo aguas arriba del punto de la piscina. Realizada la delimitación de la cuenca, se realizó la siguiente división de subcuencas: Ver figura 38.

1. Cuenca Río Lindo bajo desde la confluencia con el río Calandaima hasta la cuenca intermedia del Río Lindo
2. Corresponde a la Zona Urbana del municipio de Viotá
3. Cuenca Intermedia Río Lindo
4. Cuenca de afluente aguas arriba del sitio de la futura PTAR
5. Cuenca Baja de la Q. Pilama, entre la confluencia de la Q. Pilama y Río Lindo y confluencia Q. Pilama y Q. San Juan
6. Cuenca alta del Río Lindo, aguas arriba del punto de la piscina
7. Cuenca alta de la Q. La Pilama.

²⁴ Ráster: Es un modelo espacial de datos que define una matriz de datos, donde cada elemento contiene un valor atributivo del tipo de información a presentar y corresponden a una imagen o mapa de bits donde el elemento es un píxel.

8. Cuenca de la Q. San Juan

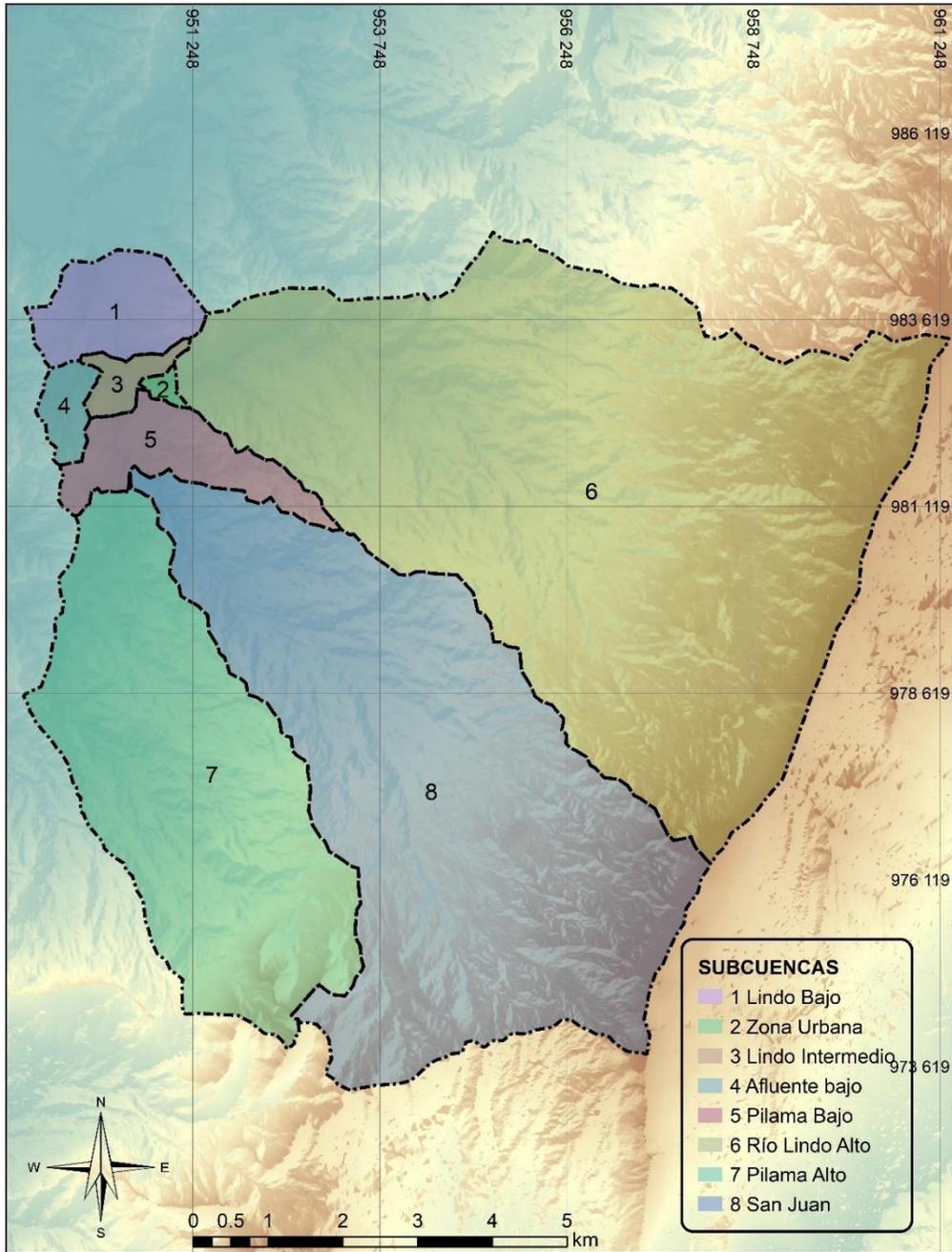


Figura 38. Subcuencas Río Lindo. Fuente: IGAC

5.1 Morfología de la cuenca de estudio

Mediante el análisis espacial de la información mediante archivos ráster y de vectores, se realizó el análisis de los siguientes parámetros:

1. Áreas de las subcuencas en km², ver figura 39.
2. Pendientes del terreno (geomorfología), ver figura 40.
3. Perfiles de los cauces principales: Río Lindo, Q. Pilama y Q. San Juan, determinando la pendiente media y compensada de los cauces.
4. Pendiente media de las cuencas principales, mediante el análisis de pendiente ponderada por clases de pendientes y su frecuencia acumulada.

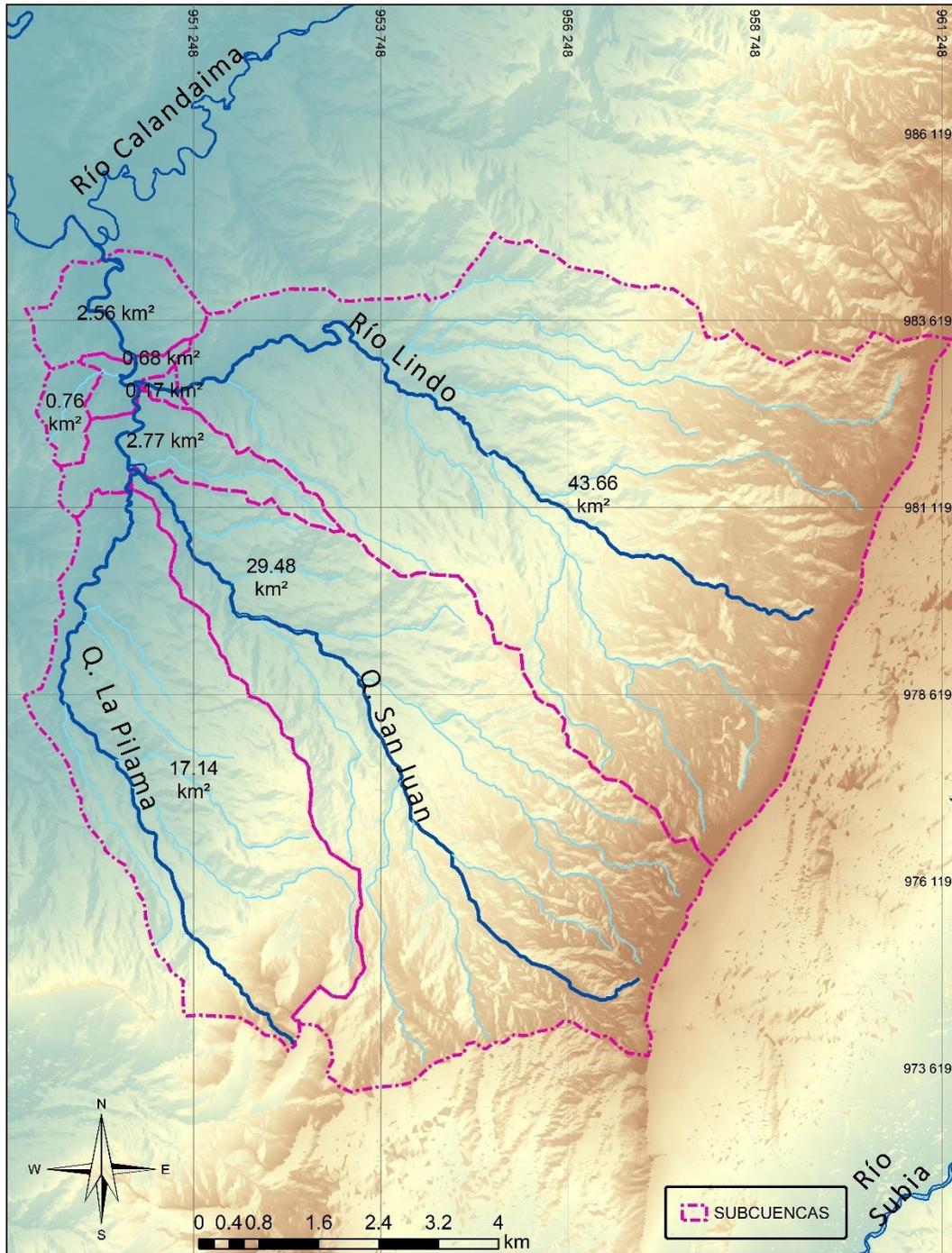


Figura 39. Áreas de las subcuencas Río Lindo. Fuente: IGAC

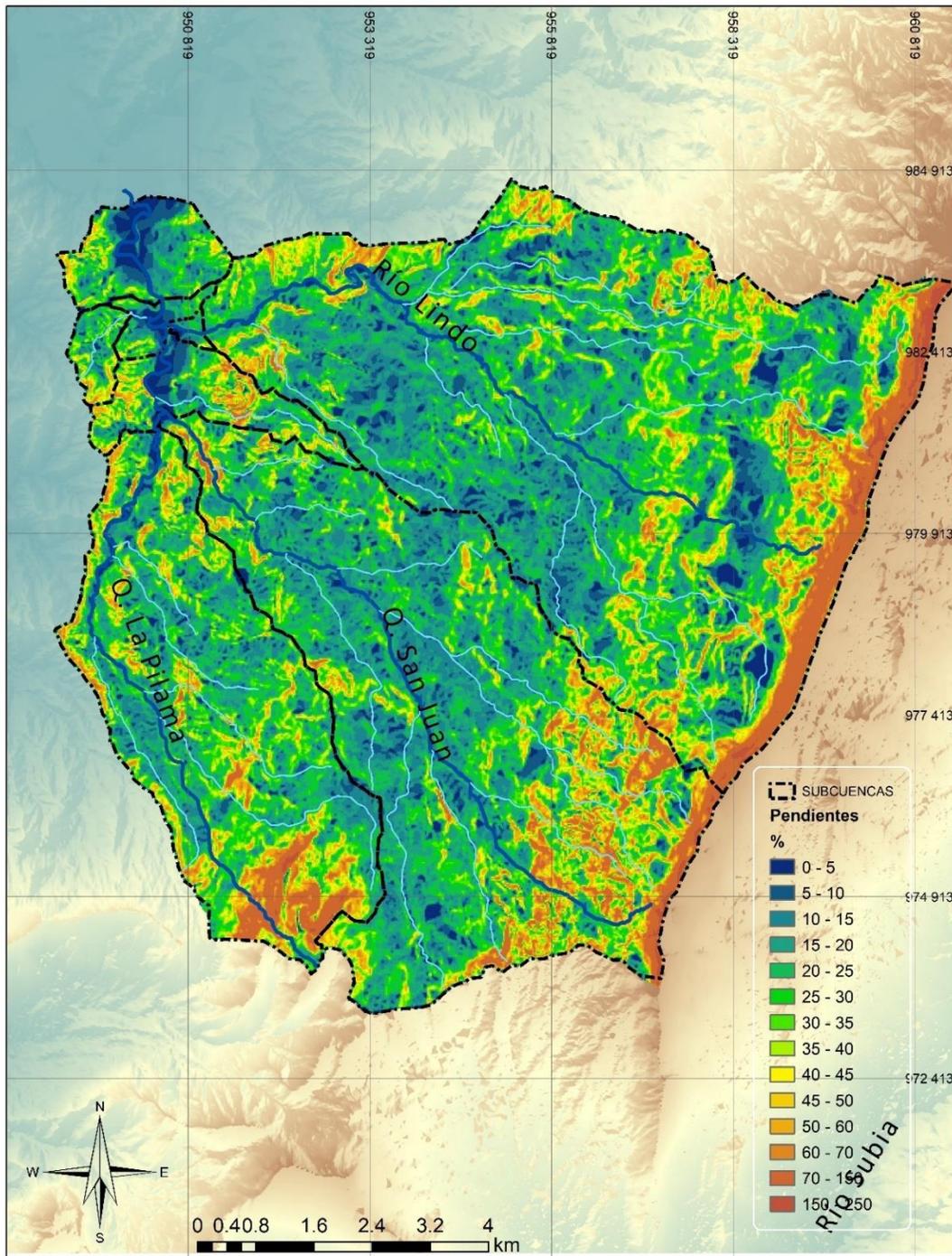


Figura 40. Distribución espacial de pendientes en la cuenca del Río Lindo. Fuente: IGAC

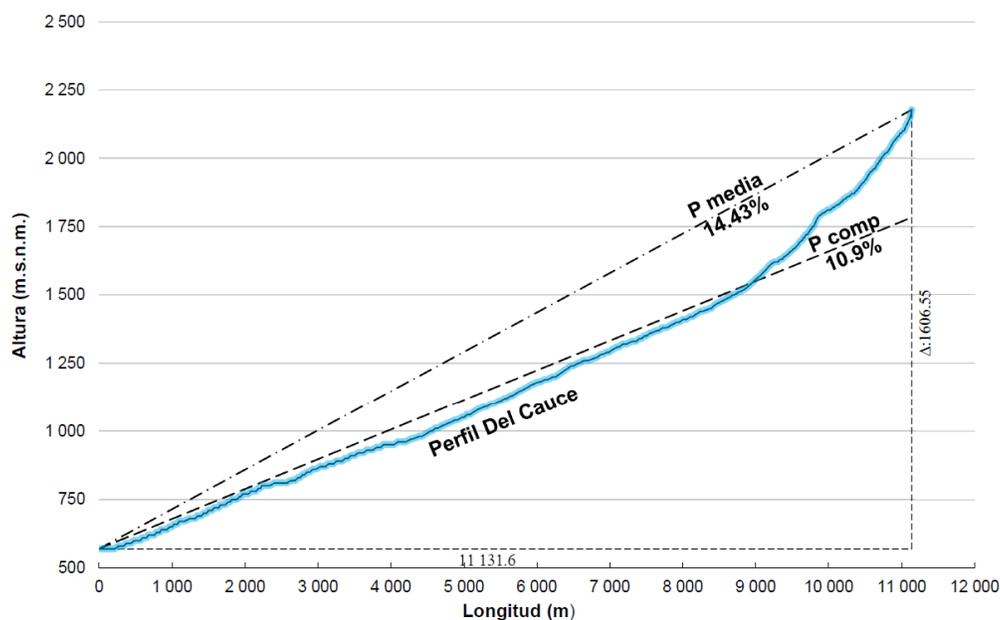


Figura 41. Pendiente cauce media y compensada del Quebrada San Juan.

Tabla 38. Cálculo pendiente media Q. San Juan

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
1	0 - 5	1 503	2.04%	100.00%	2.50%	38
2	5 - 10	3 313	4.50%	97.96%	7.50%	248
3	10 - 15	11 434	15.54%	93.45%	12.50%	1429
4	15 - 20	14 720	20.01%	77.91%	17.50%	2576
5	20 - 25	11 509	15.65%	57.90%	22.50%	2590
6	25 - 30	7 670	10.43%	42.25%	27.50%	2109
7	30 - 35	5 389	7.33%	31.83%	32.50%	1751
8	35 - 40	3 894	5.29%	24.50%	37.50%	1460
9	40 - 45	3 000	4.08%	19.21%	42.50%	1275
10	45 - 50	2 318	3.15%	15.13%	47.50%	1101
11	50 - 55	1 940	2.64%	11.98%	52.50%	1019
12	55 - 60	1 469	2.00%	9.34%	57.50%	845
13	60 - 65	1 198	1.63%	7.34%	62.50%	749
14	65 - 70	932	1.27%	5.72%	67.50%	629
15	70 - 75	752	1.02%	4.45%	72.50%	545
16	75 - 80	556	0.76%	3.43%	77.50%	431
17	80 - 85	381	0.52%	2.67%	82.50%	314
18	85 - 90	325	0.44%	2.15%	87.50%	284
19	90 - 95	230	0.31%	1.71%	92.50%	213
20	95 - 100	175	0.24%	1.40%	97.50%	171
21	100 - 105	139	0.19%	1.16%	102.50%	142
22	105 - 110	89	0.12%	0.97%	107.50%	96
23	110 - 115	91	0.12%	0.85%	112.50%	102
24	115 - 120	71	0.10%	0.73%	117.50%	83
25	120 - 125	60	0.08%	0.63%	122.50%	74

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
26	125 - 130	46	0.06%	0.55%	127.50%	59
27	130 - 135	36	0.05%	0.49%	132.50%	48
28	135 - 140	46	0.06%	0.44%	137.50%	63
29	140 - 145	41	0.06%	0.38%	142.50%	58
30	145 - 150	39	0.05%	0.32%	147.50%	58
31	150 - 155	37	0.05%	0.27%	152.50%	56
32	155 - 160	36	0.05%	0.22%	157.50%	57
33	160 - 165	28	0.04%	0.17%	162.50%	46
34	165 - 170	29	0.04%	0.13%	167.50%	49
35	170 - 175	13	0.02%	0.09%	172.50%	22
36	175 - 180	15	0.02%	0.07%	177.50%	27
37	180 - 185	11	0.01%	0.05%	182.50%	20
38	185 - 190	3	0.00%	0.04%	187.50%	6
39	190 - 195	4	0.01%	0.03%	192.50%	8
40	195 - 200	1	0.00%	0.03%	197.50%	2
41	200 - 205	4	0.01%	0.03%	202.50%	8
42	205 - 210	2	0.00%	0.02%	207.50%	4
43	210 - 215	5	0.01%	0.02%	212.50%	11
44	215 - 220	2	0.00%	0.01%	217.50%	4
45	>225	6	0.01%	0.01%	222.50%	13
		73 562	100.00%			20 892

Fuente: CAR

$$Pendiente\ media = \frac{\sum_{i=1}^k (\# Ocurrencias_i \times Pendiente\ media_i)}{\sum_{i=1}^k \# Ocurrencias_i}$$

$$Pendiente\ media = \frac{20892\%}{73562} = 28.4\%$$

La pendiente media de la cuenca de la quebrada San Juan arrojó un valor de 28.40% y se puede clasificar tipo escarpado.

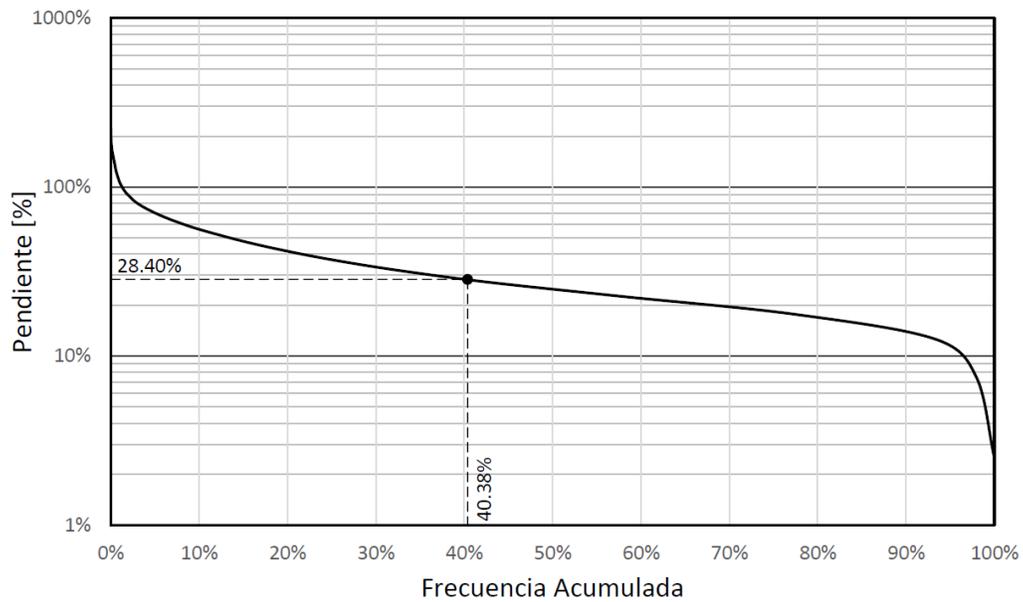


Figura 42. Pendiente media de la cuenca de la Q. San Juan. Fuente: CAR

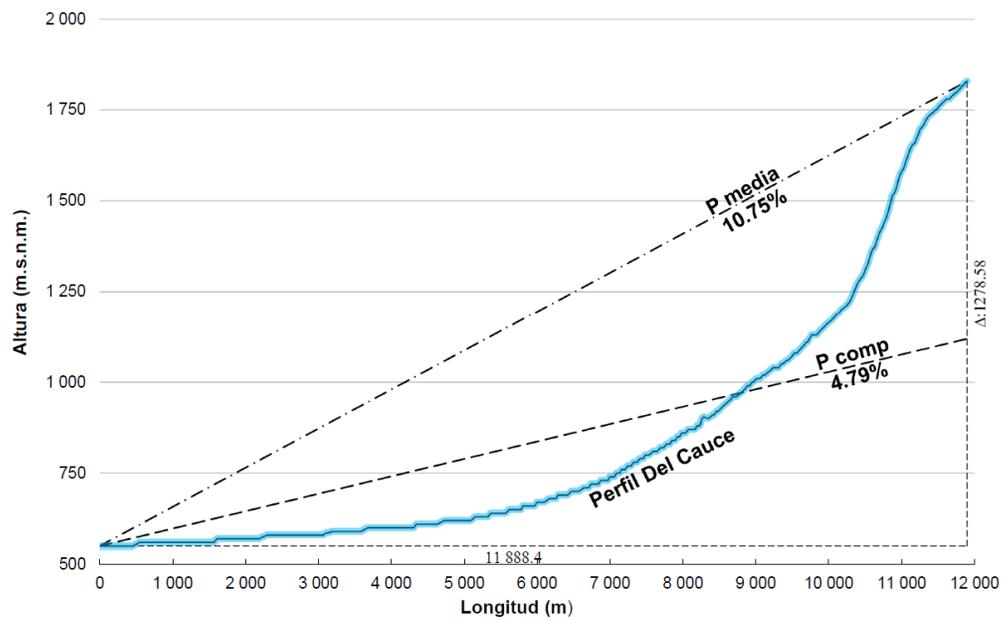


Figura 43. Pendiente media y compensada del cauce Q. La Pilama. Fuente: CAR

Tabla 39. Cálculo pendiente media Q. Pilama

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
1	0 - 5	871	2.03%	100.00%	2.50%	22
2	5 - 10	1 517	3.54%	97.97%	7.50%	114
3	10 - 15	5 034	11.75%	94.42%	12.50%	629
4	15 - 20	7 512	17.54%	82.67%	17.50%	1315
5	20 - 25	6 866	16.03%	65.13%	22.50%	1545
6	25 - 30	5 263	12.29%	49.10%	27.50%	1447
7	30 - 35	3 853	9.00%	36.81%	32.50%	1252
8	35 - 40	2 879	6.72%	27.82%	37.50%	1080
9	40 - 45	2 096	4.89%	21.10%	42.50%	891
10	45 - 50	1 482	3.46%	16.20%	47.50%	704
11	50 - 55	1 201	2.80%	12.74%	52.50%	631
12	55 - 60	920	2.15%	9.94%	57.50%	529
13	60 - 65	657	1.53%	7.79%	62.50%	411
14	65 - 70	502	1.17%	6.26%	67.50%	339
15	70 - 75	396	0.92%	5.09%	72.50%	287
16	75 - 80	280	0.65%	4.16%	77.50%	217
17	80 - 85	234	0.55%	3.51%	82.50%	193
18	85 - 90	194	0.45%	2.96%	87.50%	170
19	90 - 95	191	0.45%	2.51%	92.50%	177
20	95 - 100	149	0.35%	2.06%	97.50%	145
21	100 - 105	137	0.32%	1.71%	102.50%	140
22	105 - 110	106	0.25%	1.39%	107.50%	114
23	110 - 115	106	0.25%	1.15%	112.50%	119
24	115 - 120	71	0.17%	0.90%	117.50%	83
25	120 - 125	53	0.12%	0.73%	122.50%	65
26	125 - 130	51	0.12%	0.61%	127.50%	65
27	130 - 135	49	0.11%	0.49%	132.50%	65
28	135 - 140	42	0.10%	0.38%	137.50%	58
29	140 - 145	23	0.05%	0.28%	142.50%	33
30	145 - 150	16	0.04%	0.22%	147.50%	24
31	150 - 155	20	0.05%	0.19%	152.50%	31
32	155 - 160	13	0.03%	0.14%	157.50%	20
33	160 - 165	10	0.02%	0.11%	162.50%	16
34	165 - 170	10	0.02%	0.09%	167.50%	17
35	170 - 175	2	0.00%	0.06%	172.50%	3
36	175 - 180	9	0.02%	0.06%	177.50%	16
37	180 - 185	5	0.01%	0.04%	182.50%	9
38	185 - 190	3	0.01%	0.03%	187.50%	6
39	190 - 195	2	0.00%	0.02%	192.50%	4
40	195 - 200	2	0.00%	0.01%	197.50%	4
41	200 - 205	3	0.01%	0.01%	202.50%	6
42	205 - 210	0	0.00%	0.00%	207.50%	0
43	210 - 215	1	0.00%	0.00%	212.50%	2
44	215 - 220	0	0.00%	0.00%	217.50%	0
45	>225	0	0.00%	0.00%	222.50%	0
		42 831	100.00%			12 996

Fuente: CAR

$$Pendiente\ media = \frac{\sum_{i=1}^k (\# Ocurrencias_i \times Pendiente\ media_i)}{\sum_{i=1}^k \# Ocurrencias_i}$$

$$Pendiente\ media = \frac{12996\%}{42831} = 30.34\%$$

La pendiente media de la cuenca del río Lindo arrojó un valor de 30.34% y se puede clasificar tipo escarpado.

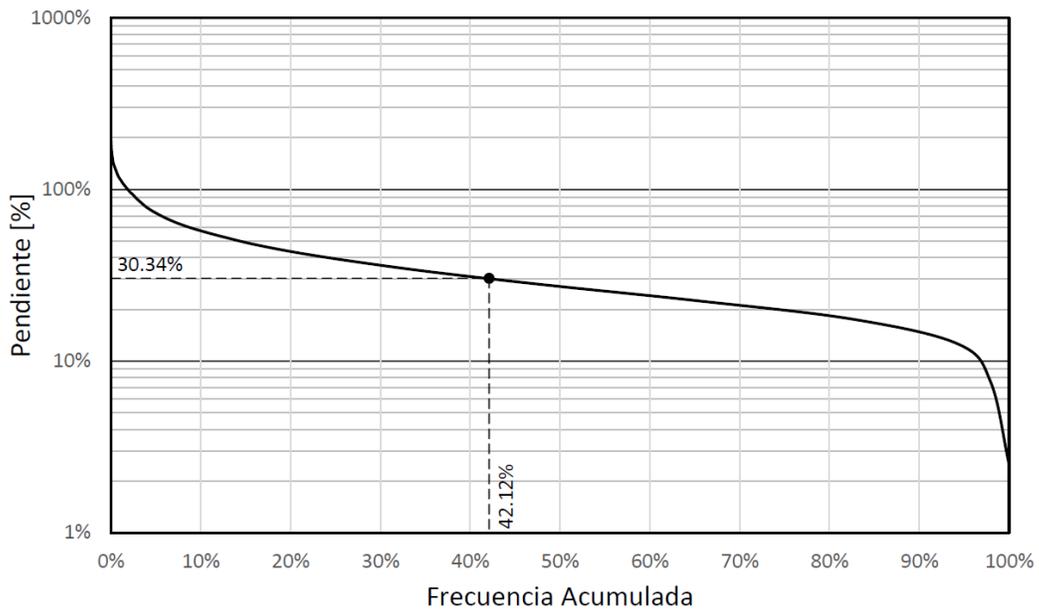


Figura 44. Pendiente media de la cuenca de la Q. La Pilama. Fuente: CAR

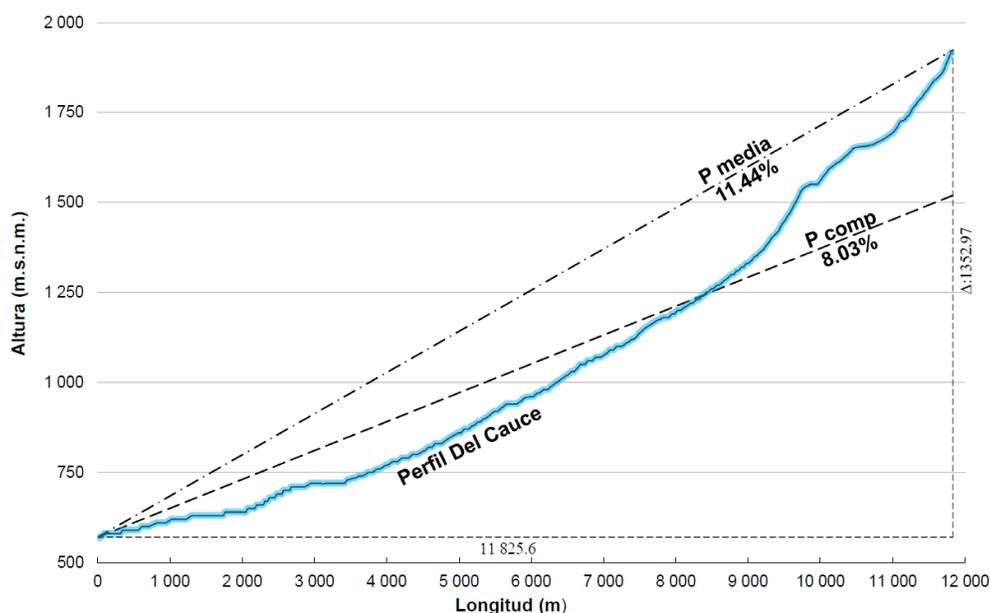


Figura 45. Pendiente media y compensada del cauce Río Lindo. Fuente: CAR

Tabla 40. Análisis de la pendiente media de la cuenca del Río Lindo

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
1	0 - 5	3 320	3.05%	100.00%	2.50%	83
2	5 - 10	6 182	5.68%	96.95%	7.50%	464
3	10 - 15	16 469	15.12%	91.28%	12.50%	2059
4	15 - 20	19 350	17.77%	76.15%	17.50%	3386
5	20 - 25	15 877	14.58%	58.39%	22.50%	3572
6	25 - 30	11 831	10.86%	43.81%	27.50%	3254
7	30 - 35	8 576	7.87%	32.94%	32.50%	2787
8	35 - 40	6 313	5.80%	25.07%	37.50%	2367
9	40 - 45	4 581	4.21%	19.27%	42.50%	1947
10	45 - 50	3 492	3.21%	15.07%	47.50%	1659
11	50 - 55	2 642	2.43%	11.86%	52.50%	1387
12	55 - 60	1 856	1.70%	9.43%	57.50%	1067
13	60 - 65	1 245	1.14%	7.73%	62.50%	778
14	65 - 70	991	0.91%	6.59%	67.50%	669
15	70 - 75	690	0.63%	5.68%	72.50%	500
16	75 - 80	601	0.55%	5.04%	77.50%	466
17	80 - 85	447	0.41%	4.49%	82.50%	369
18	85 - 90	329	0.30%	4.08%	87.50%	288
19	90 - 95	349	0.32%	3.78%	92.50%	323
20	95 - 100	345	0.32%	3.46%	97.50%	336
21	100 - 105	381	0.35%	3.14%	102.50%	391
22	105 - 110	324	0.30%	2.79%	107.50%	348
23	110 - 115	332	0.30%	2.49%	112.50%	374
24	115 - 120	312	0.29%	2.19%	117.50%	367

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
25	120 - 125	323	0.30%	1.90%	122.50%	396
26	125 - 130	257	0.24%	1.61%	127.50%	328
27	130 - 135	213	0.20%	1.37%	132.50%	282
28	135 - 140	163	0.15%	1.18%	137.50%	224
29	140 - 145	144	0.13%	1.03%	142.50%	205
30	145 - 150	160	0.15%	0.89%	147.50%	236
31	150 - 155	144	0.13%	0.75%	152.50%	220
32	155 - 160	105	0.10%	0.61%	157.50%	165
33	160 - 165	88	0.08%	0.52%	162.50%	143
34	165 - 170	89	0.08%	0.44%	167.50%	149
35	170 - 175	57	0.05%	0.36%	172.50%	98
36	175 - 180	56	0.05%	0.30%	177.50%	99
37	180 - 185	46	0.04%	0.25%	182.50%	84
38	185 - 190	44	0.04%	0.21%	187.50%	83
39	190 - 195	36	0.03%	0.17%	192.50%	69
40	195 - 200	23	0.02%	0.14%	197.50%	45
41	200 - 205	24	0.02%	0.11%	202.50%	49
42	205 - 210	29	0.03%	0.09%	207.50%	60
43	210 - 215	18	0.02%	0.07%	212.50%	38
44	215 - 220	19	0.02%	0.05%	217.50%	41
45	220 - 225	8	0.01%	0.03%	222.50%	18
46	225 - 230	9	0.01%	0.02%	227.50%	20
47	230 - 235	9	0.01%	0.02%	232.50%	21
48	235 - 240	2	0.00%	0.01%	237.50%	5
49	240 - 245	4	0.00%	0.01%	242.50%	10
50	245 - 250	2	0.00%	0.00%	247.50%	5
51	250 - 255	0	0.00%	0.00%	252.50%	0
52	>255	1	0.00%	0.00%	257.50%	3
		108 908	100.00%			32 336

Fuente: CAR

$$Pendiente\ media = \frac{\sum_{i=1}^k (\# Ocurrencias_i \times Pendiente\ media_i)}{\sum_{i=1}^k \# Ocurrencias_i}$$

$$Pendiente\ media = \frac{32336\%}{108908} = 29.69\%$$

La pendiente media de la cuenca del río Lindo arrojó un valor de 29.69% y se puede clasificar tipo escarpado.

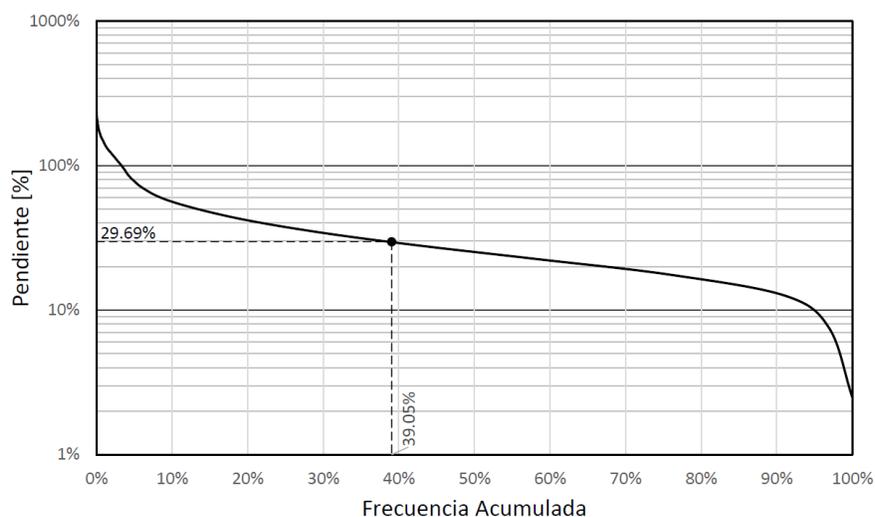


Figura 46. Pendiente media de la cuenca del Río Lindo. Fuente: CAR

5.2 Metodología del número de curva CN, del SCS.

Para determinar las condiciones de infiltración para la cuenca en cuestión se adopta el método del Soil Conservation Service de número de curva, el método requiere la definición de las siguientes condiciones:

Tabla 41. Condiciones Soil Conservation Service número de curva

Condición	Tipo Cobertura	Valor Adoptado
1	Clasificación hidrológica de los suelos.	C
2	Uso y tratamiento del Suelo	Ver tabla 42
3	Condición Hidrológica	Ver tabla 43
4	Condición de humedad antecedente.	AMC - II

Fuente: CAR

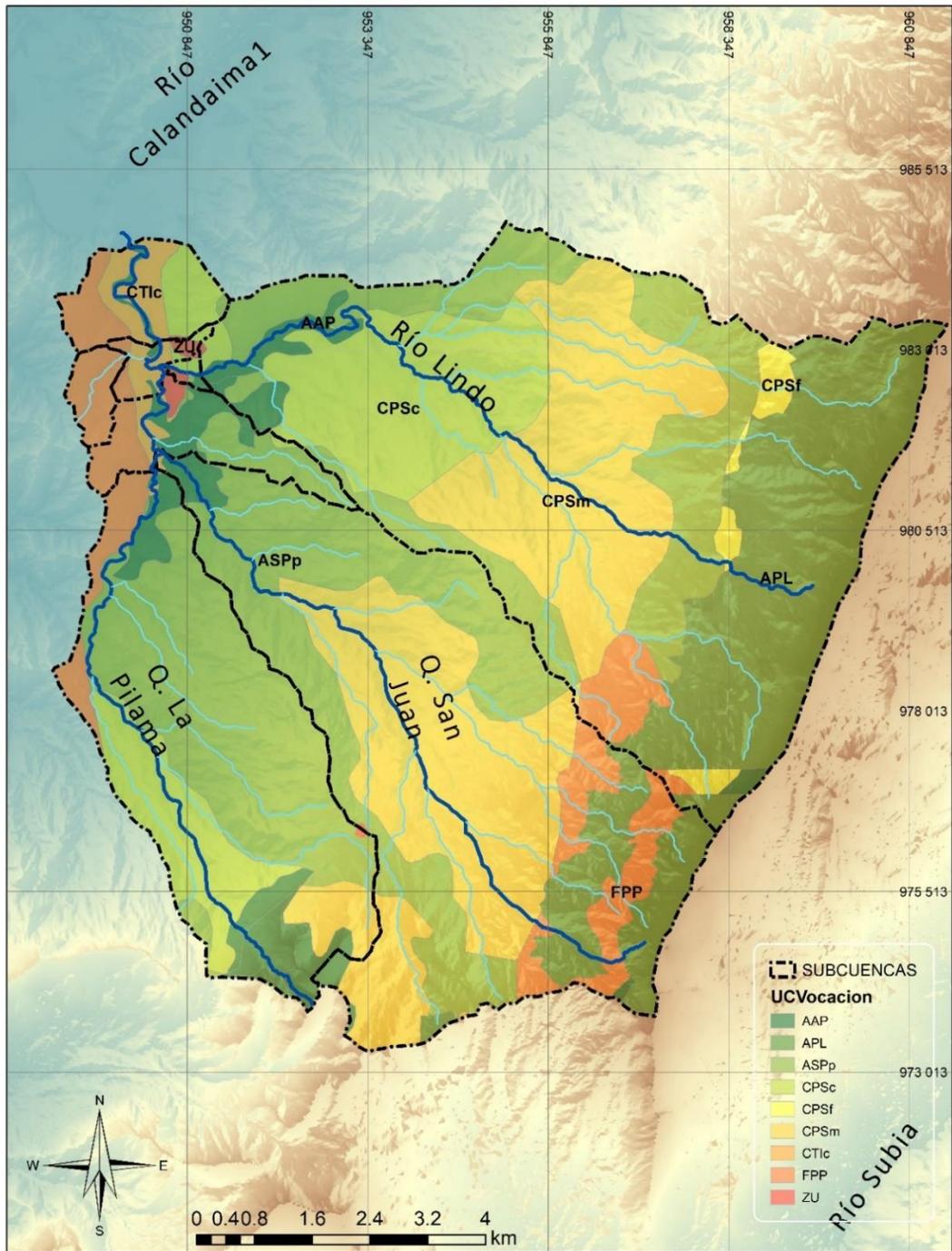


Figura 47. Distribución de usos del suelo y tratamiento del suelo. Fuente: IGAC

5.2.1 Clasificación hidrológica de los suelos

Para la clasificación hidrológica del suelo se tiene principalmente suelos de depósitos fluvio glaciares (Qfg), “constituido principalmente por bloques y cantos angulares a subredondeados, de areniscas, provenientes del grupo Guadalupe, - Olini, los cuales están embebidos en una matriz de arena gruesa a arcilla.” “Estas formaciones de sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular de muy baja producción o capacidad específica (menor a 0.01 L/s/m)”, ver en la parte baja de la cuenca, hay una condición de depósito (QAI), que presente un capacidad específica de 0.05 L/s/m, formado principalmente por material depositado por las corrientes de suelos arcillosos, limosos y parte en arenas fracturadas, el resto de la cuenca presenta un suelo tipo Stm (Sedimentario transicional marino) de edad mesozoico cretácico temprano ²⁵, ver figura 47, lo anterior indica que el suelo tiene un alto a medio potencial de escorrentía y su clasificación de acuerdo con el SCS es del tipo C.

5.2.2 Uso y tratamiento del suelo

Para el uso y tratamiento del suelo se realizó la consulta en la base de datos del IGAC, correspondiente a la capa de “Oferta Ambiental”, donde clasifican el uso y tipo de actividad para el suelo, se tiene la siguiente distribución de tipos y usos.

Tabla 42. Distribución de usos y tipo de suelo en la cuenca del río Lindo

Unidad	Tipo Cobertura	Río Lindo [ha]	Q. Pilama [ha]	Q San Juan [ha]	Total
AAP:	Áreas Prioritarias para la Conservación	124.98	214.29	65.87	405.15
APL:	Áreas de Protección Legal	1233.19		390.30	1623.49
ASPp:	Agroforestal	950.43	970.91	996.74	2918.08
CPSc:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima cálido	96.83			96.83

²⁵ CAR, Elaboración del diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Calandaima – Subcuenca 2120-3

Unidad	Tipo Cobertura	Río Lindo [ha]	Q. Pilama [ha]	Q San Juan [ha]	Total
CPSf:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima frio	746.32	324.77		1071.09
CPSm:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima medio	1082.63	92.63	1235.47	2410.73
CTIc:	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido		2.65	2.77	5.42
FPP:	Forestal	129.94	107.14	260.46	497.54
ZU:	Zonas Urbanas	1.41	1.56	0.88	3.84
Total		4365.73	1713.95	2952.49	9032.16

Fuente: CAR

5.2.3 Condición hidrológica

La condición hidrológica se determina por el porcentaje de pastos y se determina que menos del 50% en área de pastos es una condición hidrológica pobre, y entre el 50% y 75% es aceptable o regular y mayor al 75% es condición buena. De acuerdo con lo anterior y basados en la imagen satelital se tiene las siguientes condiciones hidrológicas:

Tabla 43. Determinación de la condición hidrológica por uso de suelo

Unidad	Tipo Cobertura	Condición hidrológica
AAP:	Áreas Prioritarias para la Conservación	Buena
APL:	Áreas de Protección Legal	Buena
ASPp:	Agroforestal	Regular
CPSc:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima cálido	Pobre
CPSf:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima frio	Pobre
CPSm:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima medio	Pobre
CTIc:	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	Pobre
FPP:	Forestal	Buena
ZU:	Zonas Urbanas	Pobre

Fuente: CAR

5.2.4 Condición de humedad antecedente

Para la condición y humedad antecedente, dado que no se tiene una estadística de los días de lluvias se asume tomar la condición de humedad antecedente como AMC-II, que es un valor intermedio entre completamente seco y totalmente saturado el suelo.

5.2.5 Número de curva

Con lo anterior se tienen los siguientes valores de número de curva para asignar a cada tipo de suelo:

Tabla 44. Asignación de número de curva del SCS

Unidad	Tipo Cobertura	Número de Curva
AAP	Áreas Prioritarias para la Conservación	70
APL	Áreas de Protección Legal	70
ASPp	Agroforestal	76
CPSc	Cultivos permanentes semi intensivos de clima cálido	83
CPSf	Cultivos permanentes semi intensivos de clima frío	80
CPSm	Cultivos permanentes semi intensivos de clima medio	80
CTIc	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	82
FPP	Forestal	70
ZU	Zonas Urbanas	91

Fuente: CAR

Con lo cual se obtiene el siguiente número de curva ponderado por área para cada cuenca:

Tabla 45. Cálculo de número de curva por cuenca

Unidad	Número de Curva	Rio Lindo	Q. Pilama	Q. San Juan
AAP	70	2.00	8.75	1.56
APL	70	19.77	0.00	9.25
ASPp	76	16.55	43.05	25.66
CPSc	83	1.84	0.00	0.00
CPSf	80	13.68	15.16	0.00
CPSm	80	19.84	4.32	33.48
CTIc	82	0.00	0.13	0.08

Unidad	Número de Curva	Río Lindo	Q. Pilama	Q. San Juan
FPP	70	2.08	4.38	6.18
ZU	91	0.03	0.08	0.03
Ponderado		75.79	75.87	76.23

Fuente: CAR

5.3 Tiempo de concentración

Se adoptan diferentes metodologías para determinar para cada cuenca el tiempo de concentración estimado para determinar la duración de la lluvia o tormenta y dado que por la condición topográfica de montañoso hace que los tiempos de respuesta de la cuenca sean muy rápidos, por lo tanto, se adopta que el tiempo de concentración es equiparable al de lluvia, en ausencia de datos más precisos de duración de tormentas.

Tabla 46. Valores de entrada para estimación de tiempos de concentración

Cuenca	Longitud Cauce [m]	Pendiente Cauce Principal [%]	Número de Curva
Río Lindo ¹	11825.6	8.03	75.79
Q. Pilama	11888.4	4.79	75.87
Q. San Juan	11131.6	10.9	76.23

Fuente: CAR

¹Cuenca aguas arriba del punto de control de la piscina

5.3.1 Tc de la Quebrada San Juan

Tabla 47. Tiempo de Concentración cuenca Q. San Juan

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
George Rivero	3.07	03:03
Williams	2.98	02:58
Bransby-Williams	2.98	02:58
Johnstone y Cross	2.68	02:41
Corps Engineer UAE	2.66	02:39
Passini	2.26	02:15
Onda cinemática	2.25	02:15

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
Hathaway	2.04	02:02
Federal Aviation Adm.	1.77	01:46
Giandotti	1.38	01:22
Témez	1.19	01:11
V.T. Chow	1.17	01:10
Ventura - Heras	1.17	01:10
California	1.00	00:59
Kirpich	0.99	00:59
SCS – Ranser	0.99	00:59
Promedio	2.12	02:07

Fuente: CAR

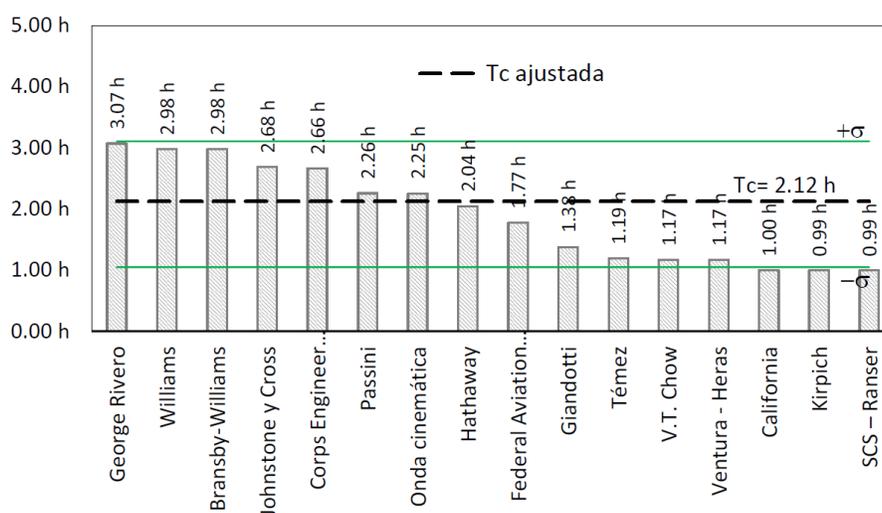


Figura 48. Tiempo de Concentración de la cuenca Q. San Juan. Fuente: CAR

5.3.2 Tc de la Quebrada Pilama

Tabla 48. Tiempo de Concentración cuenca Q. Pilama

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
Johnstone y Cross	3.41 h	03:24
George Rivero	3.38 h	03:23
Corps Engineer UAE	3.27 h	03:16
Onda cinemática	3.25 h	03:15
Passini	2.90 h	02:54

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
Hathaway	2.56 h	02:33
Federal Aviation Adm.	2.40 h	02:24
Giandotti	1.80 h	01:48
V.T. Chow	1.59 h	01:35
Promedio	2.73	02:43

Fuente: CAR

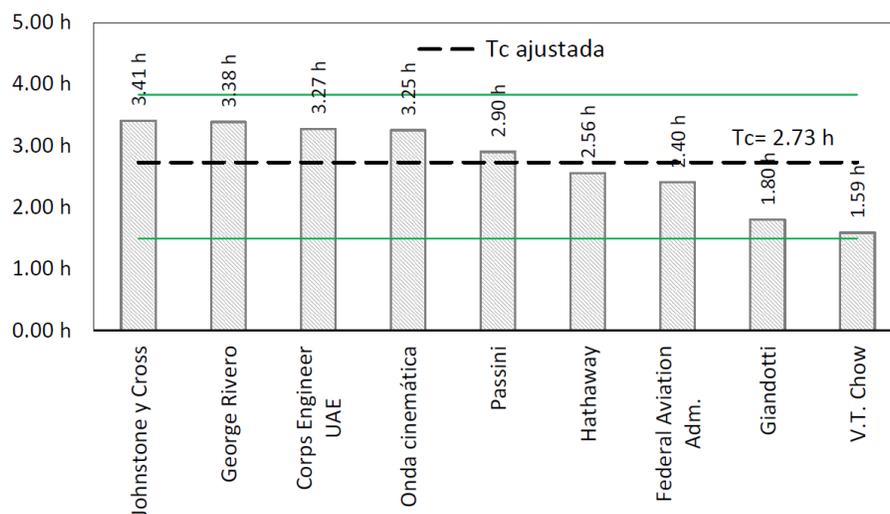


Figura 49. Tiempo de Concentración de la cuenca Q. Pilama. Fuente: CAR

5.3.3 Tc del río Lindo

Tabla 49. Tiempo de Concentración cuenca del río Lindo

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
George Rivero	3.30 h	03:17
Williams	3.23 h	03:14
Bransby-Williams	3.23 h	03:13
Passini	3.06 h	03:03
Johnstone y Cross	2.99 h	02:59
Corps Engineer UAE	2.96 h	02:57
Onda cinemática	2.59 h	02:35
Hathaway	2.26 h	02:15
Federal Aviation Adm.	2.02 h	02:01
Giandotti	1.79 h	01:47

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
V.T. Chow	1.34 h	01:20
Témez	1.32 h	01:19
Ventura - Heras	1.29 h	01:17
California	1.18 h	01:10
Kirpich	1.17 h	01:10
SCS – Ranser	1.17 h	01:10
Promedio	2.18	02:10

Fuente: CAR

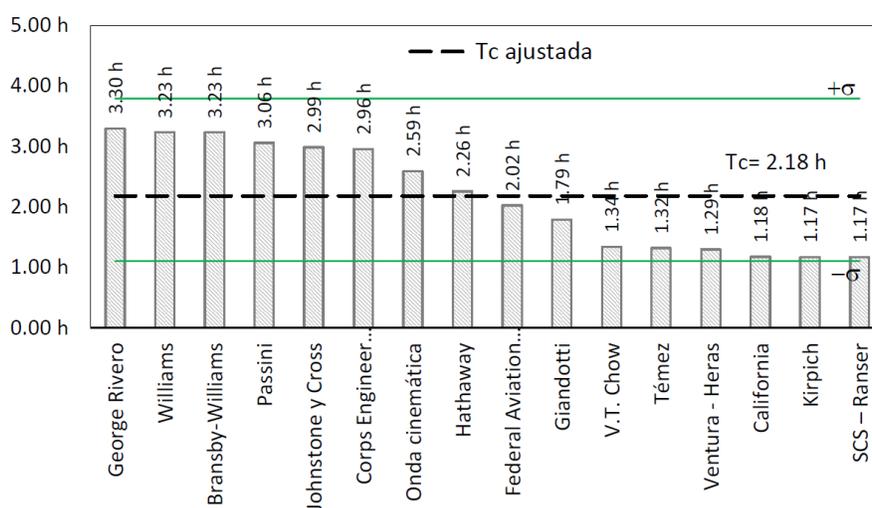


Figura 50. Tiempo de Concentración de la cuenca Río Lindo. Fuente: CAR

De acuerdo con los resultados anteriores, se asume una duración de tormenta de dos horas.

5.4 Precipitación

Se tomará una precipitación tal que permita establecer que el pico del hidrograma de salida de la cuenca corresponda con el valor del caudal medido en el día de campo, estableciendo así los hidrogramas de entrada para el modelo de calidad.

De acuerdo con los resultados de la modelación hidrológica, se debe tener una precipitación de 17.2 mm en dos horas de lluvia.

5.5 Tormenta de aplicación

Dado la falta de información de la tormenta, se adopta el Hietograma o distribución de tormentas del primer cuartil de la distribución por Huff, en donde es representativo para los eventos de lluvia de las cuencas tipo montañoso, es decir, se espera que el 80% de la precipitación acumulada, se presente en por lo menos el 50% del tiempo esperado del aguacero.

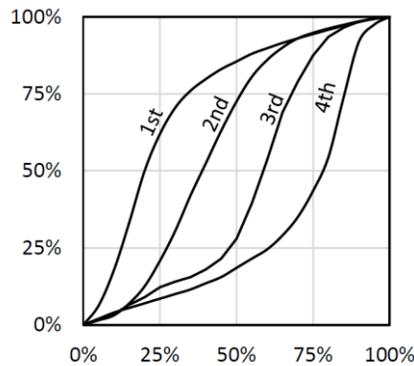


Figura 51. Distribución unitaria de Lluvia tipo Huff. Fuente: CAR

Al aplicar el valor de precipitación de 17.2 mm, se obtiene la siguiente distribución temporal de la lluvia (hietograma):

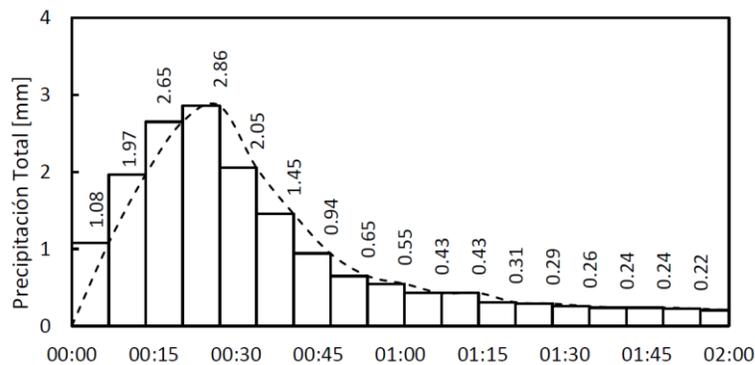


Figura 52. Precipitación proyectada cuenca Río Lindo. Fuente: CAR

5.6 Modelo hidrológico

Con la información anterior se realiza la definición de los siguientes parámetros del modelo:

Tabla 50. Parámetros de las quebradas y del río Lindo

Parámetro	Río Lindo	Q. La Pilama	Q. San Juan
Área cuenca [km²]	43.6573	17.1395	29.5249
CN	75.79	75.87	76.23
Longitud Cauce principal [m]	11825.6	11888.4	11131.6
Pendiente Drenaje Principal	8.03%	4.79%	10.90%
Tiempo de desfase [h]	1.43	1.85	1.15
Tiempo al pico [h]	2.55	3.22	2.28
Caudal Pico Unitario m³/s/mm	3.560	1.106	2.698
Precipitación Total /día [mm]	17.20	17.20	17.20
Retención Máxima S [mm]	81.13	80.78	79.21
Abstracción Inicial 0.2S [mm]	16.23	16.16	15.84
Precipitación efectiva [mm]	0.01	0.01	0.02
Duración Evento [h]	6.80	8.60	6.07

Fuente: CAR

Se utiliza el software Storm de la casa Autodesk para realizar el modelado hidrológico, con los siguientes parámetros de modelado:

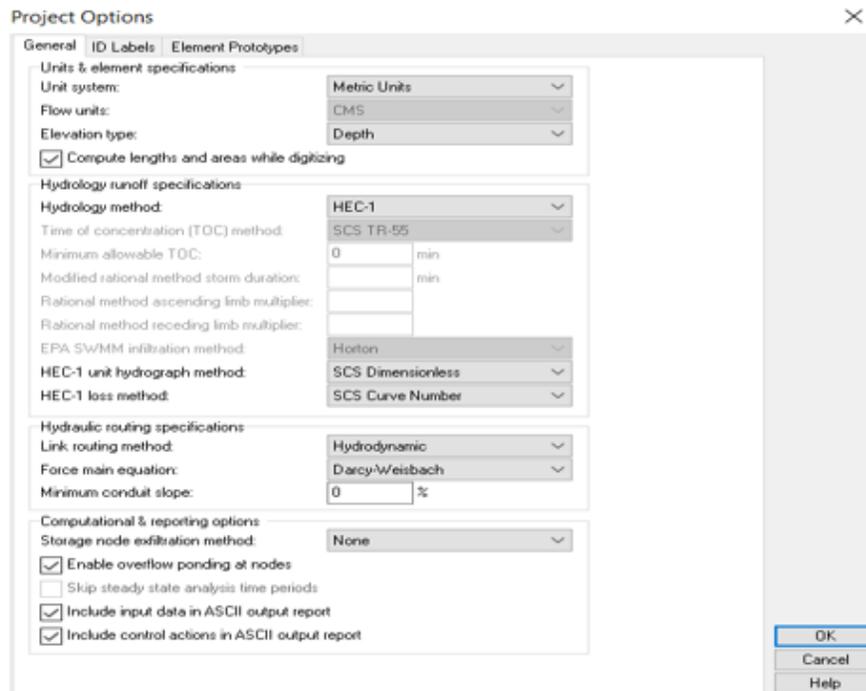


Figura 53. Parámetros del modelo hidrológico. Fuente: CAR

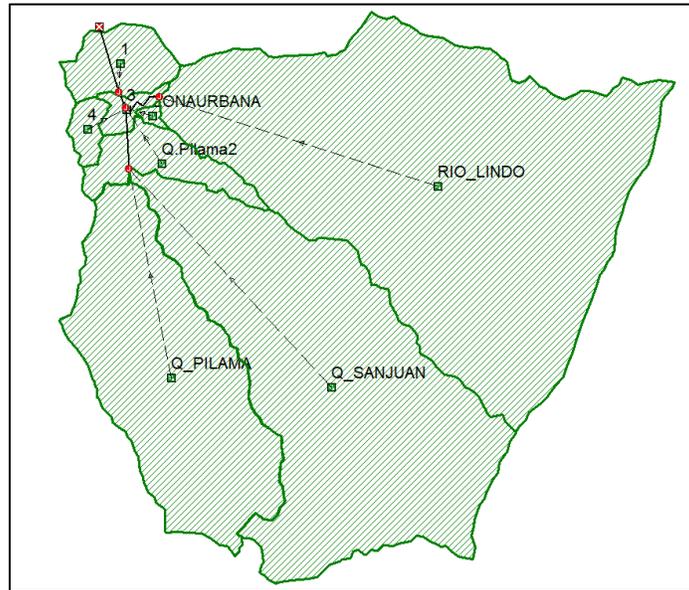


Figura 54. Modelo Escorrentía por el número de Curva del SCS. Fuente: CAR

Subbasins

General Subbasin ID: RIO_LINDO Connectivity: PRECIPITACION Rain gage: Jun-01 Outlet node: Jun-01

Description: CuencaRioo Lindo,Viota

Physical Properties Loss & UH Parameters

Basin data

Area: 4365.73 ha

Base flow

Initial base flow: 0 cms

Recession base flow: 0 cms

Recession constant: 0

Analysis summary

Peak runoff: 0.084 cms Total precipitation: 17.280 mm

Total runoff: 0.013 mm Total infiltration: 17.267 mm

Subbasin ID /	Area	Rain Gage ID
3 3	67.93	PRECIPITACION
4 4	76.44	PRECIPITACION
5 Q_Pilama2	276.56	PRECIPITACION
6 Q_PILAMA	1713.95	PRECIPITACION
7 Q_SANJUAN	2948.40	PRECIPITACION
8 RIO_LINDO	4365.73	PRECIPITACION

Close Help

Subbasins

General Subbasin ID: RIO_LINDO Connectivity: PRECIPITACION Rain gage: Jun-01 Outlet node: Jun-01

Description: CuencaRioo Lindo,Viota

Physical Properties Loss & UH Parameters

SCS curve number loss method

Curve number: 75.79

Initial abstraction (mm): 16.23 Calc

Impervious area (%): 0

SCS dimensionless unit hydrograph method

Lag time: 1.43 hr

Subbasin ID /	Area	Rain Gage ID
3 3	67.9338	PRECIPITACION
4 4	76.4430	PRECIPITACION
5 Q_Pilama2	276.5612	PRECIPITACION
6 Q_PILAMA	1713.9462	PRECIPITACION
7 Q_SANJUAN	2948.4000	PRECIPITACION
8 RIO_LINDO	4365.7268	PRECIPITACION

Close Help

Figura 55. Datos de entrada para las cuencas. Fuente: CAR

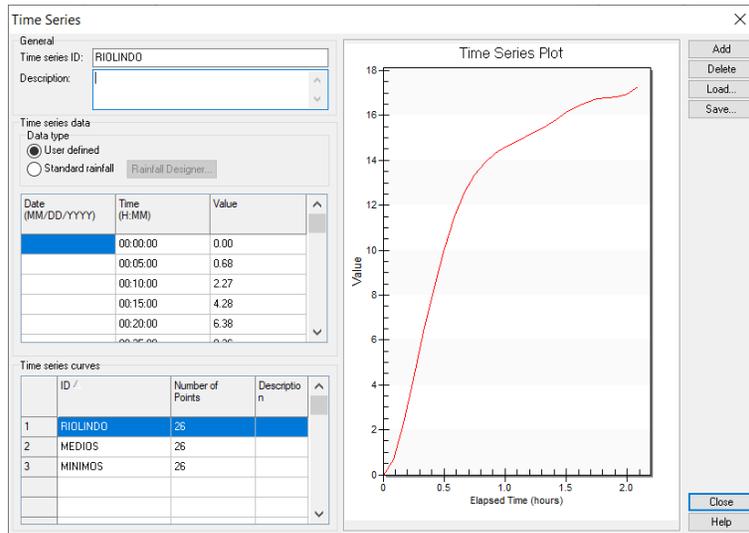


Figura 56. Datos de entrada para modelo de lluvia. Fuente: CAR

5.7 Resultados

Para las diferentes cuencas se obtuvieron los siguientes hidrogramas de salida de las cuencas.

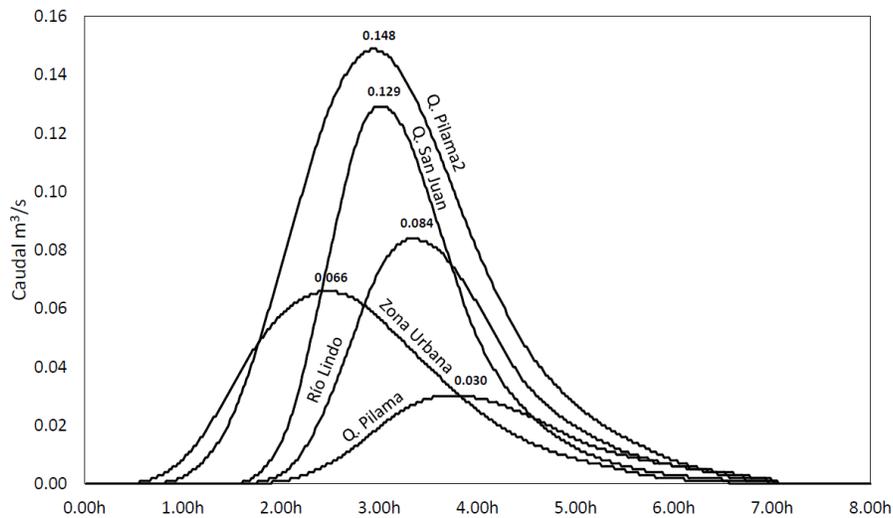


Figura 57. Hidrogramas de salida de las cuencas del modelo de escorrentía. Fuente: CAR

De acuerdo con la configuración tenemos los siguientes nodos de control de caudales, ver figura 57:

1. Piscina, que corresponde al hidrograma de Río Lindo (Sección 1-1).

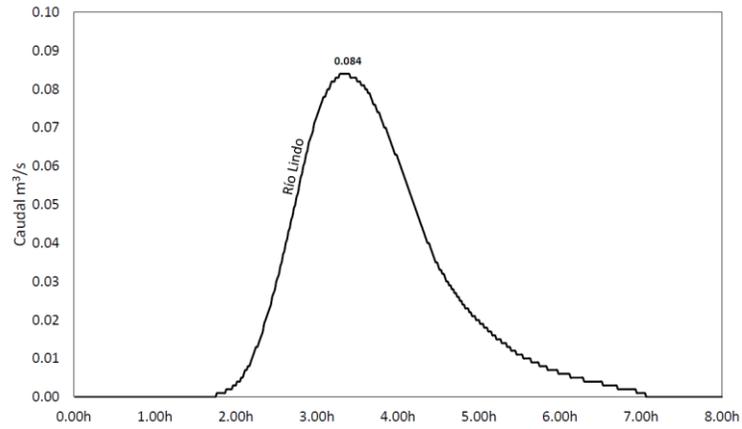


Figura 58. Hidrograma Nodo 1. Fuente: CAR

2. Confluencia aguas arriba de Pilama y Río Lindo, que corresponderá a los hidrogramas de Q. La Pilama y Q. San Juan. (Sección 4-4)

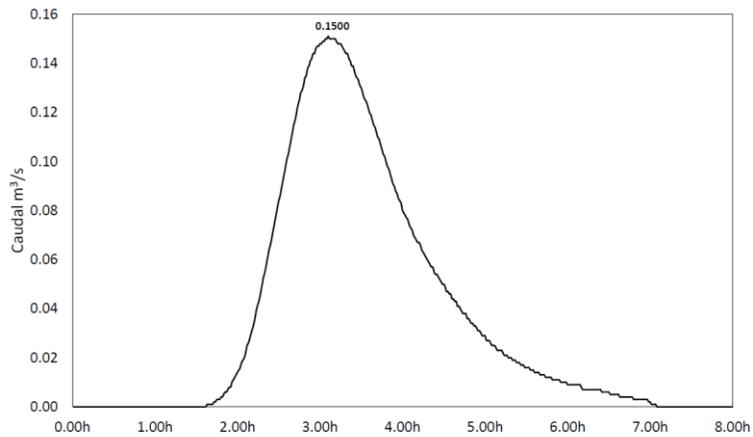


Figura 59. Hidrograma Nodo 2. Fuente: CAR

3. Nodo de futura PTAR, hidrograma de referencia (Sección 5-5)

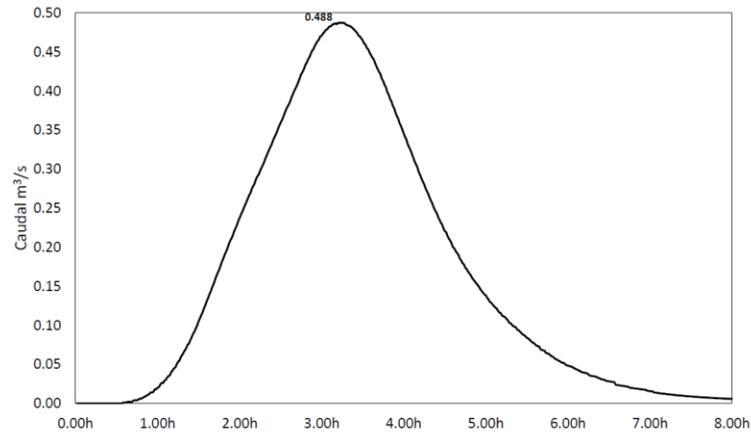


Figura 60. Hidrograma Nodo 3. Fuente: CAR

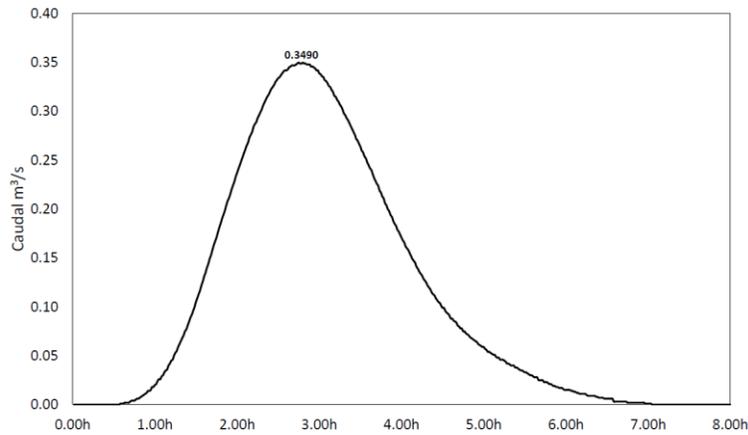


Figura 61. Hidrograma N3-N2-N1. Fuente: CAR

5.8 Cálculo del índice $7Q_{10}$

Para determinar los caudales se utilizó la información de dos estaciones ubicadas en la zona de estudio pertenecientes a la Corporación Autónoma Regional – CAR, una se encuentra sobre la corriente del río Lindo que es la estación Viotá y sobre La Quebrada San Juana la estación Pte. Sáenz. Estas son de categoría limnimétrica, tecnología convencional y su fecha de instalación es el 15 de enero de 1987.

Tabla 51. Características de las estaciones limnimétricas

Código	Tipo	Nombre	Elevación (m.s.n.m)	Norte (m)	Este (m)
2120896	LM	Viotá	589	982696	950764
2120900	LM	Puente Sáenz	597	981688	950561

Fuente: elaboración propia

Para determinar el caudal $7Q_{10}$ se realizó un promedio móvil de ventana de 7 días a partir de caudales medios diarios, luego se agruparon los caudales mínimos semanales por cada año. Seguidamente, realizar la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos y seleccionar el caudal correspondiente al período de retorno de 10 años. Ver anexo 1 y anexo 2.



Figura 62. Ubicación de las estaciones Viotá y Pte. Sáenz Fuente: IGAC, elaboración propia

Para la subcuenca del río Lindo, La quebrada Pilama y la quebrada Sirena se tomaron los caudales mínimos con diferentes períodos de retorno mediante un

análisis de frecuencia utilizando las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Log-Normal y Valores extremos, con el propósito de seleccionar la que mejor represente el comportamiento de los datos partiendo de la prueba de bondad con el Chi cuadrado, para las estaciones limnimétricas mencionadas anteriormente.

Se aplicó la prueba del Chi Cuadrado (prueba de ajuste estadística), encontrándose que la distribución probabilísticas Log-Pearson es el menor valor de esta prueba y teniendo en cuenta que los valores sean positivos, para este estudio solo necesitamos el periodo de retorno de 10 años. En las siguientes tablas se muestran los resultados de frecuencia de los caudales mínimos.

Tabla 52. Frecuencia de caudales mínimos del río Lindo 1

Tr años	NORMAL m³/s	GUMBEL m³/s	PEARSON m³/s	LOG- PEAR m³/s	LOG-NOR m³/s	EV3 m³/s
5	0.0020	-0.0078	0.0065	0.0127	0.0293	0.0053
10	-0.0461	-0.0454	-0.0108	0.0057	0.0199	-0.0107
20	-0.0828	-0.0731	-0.0197	0.0029	0.0148	-0.0184
50	-0.1189	-0.1011	-0.0254	0.0015	0.0111	-0.0230
100	-0.1389	-0.1183	-0.0275	0.0010	0.0095	-0.0247
chi 2	0.07	-0.19	0.12	0.06	0.37	-0.79

Fuente: elaboración propia

Tabla 53. Frecuencia de caudales mínimos de la Quebrada La Pilama

Tr años	NORMAL m³/s	GUMBEL m³/s	PEARSON m³/s	LOG- PEAR m³/s	LOG-NOR m³/s	EV3 m³/s
5	-0.0159	-0.0238	-0.0067	0.0039	0.0151	-0.0073
10	-0.0570	-0.0558	-0.0154	0.0015	0.0097	-0.0168
20	-0.0884	-0.0793	-0.0187	0.0007	0.0069	-0.0208
50	-0.1192	-0.1031	-0.0199	0.0003	0.0049	-0.0229
100	-0.1363	-0.1177	-0.0201	0.0002	0.0041	-0.0236
chi 2	0.28	-0.14	0.05	0.17	0.56	0.00

Fuente: elaboración propia

Tabla 54. Frecuencia de caudales mínimos de la Quebrada Sirena

Tr años	NORMAL m³/s	GUMBEL m³/s	PEARSON m³/s	LOG- PEAR m³/s	LOG-NOR m³/s	EV3 m³/s
5	0.00006	-0.00025	0.00021	0.00040	0.00094	0.00017
10	-0.00147	-0.00145	-0.00035	0.00018	0.00064	-0.00034
20	-0.00264	-0.00233	-0.00063	0.00009	0.00047	-0.00059
50	-0.00379	-0.00323	-0.00081	0.00005	0.00035	-0.00074
100	-0.00443	-0.00377	-0.00088	0.00003	0.00030	-0.00079
chi 2	0.002	-0.006	0.004	0.002	0.012	-0.025

Fuente: elaboración propia

Para finalizar, en la siguiente tabla se describe detalladamente los caudales 7Q₁₀ obtenidos.

Tabla 55. Caudales 7Q₁₀

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m³/s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.0015	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.00018	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 100	0.00016	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.00016	Afluente lateral izquierda

Fuente: elaboración propia

6 CAPÍTULO Proyección de población

6.1 Población municipio de Viotá

De acuerdo con la información obtenida del Censo 2018, la distribución espacial de población para el municipio de Viotá corresponde a lo presentado en la tabla 56.

Tabla 56. Distribución espacial Municipio de Viotá

Cabecera Municipal [hab]	Centros Poblados [hab]	Rural Disperso [hab]	Total, Municipio [hab]
4286	8948	-	13234

Fuente: Censo DANE 2018.²⁶

De acuerdo con los diferentes censos históricos realizados en el país, se tienen registros desde 1938 hasta el 2018, que corresponden a los siguientes habitantes para el municipio de Viotá:

Tabla 57. Censos de población Viotá

Censo	Cabecera	Años
1938	1341	1
1951	2057	14
1964	2488	27
1973	2619	36
1985	3514	48
1993	3936	56
2005	4041	68
2018	4 286	81

Fuente: Censo DANE 2018.

²⁶ DANE. Recuperado de https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#!/donde_estamos del 26 de septiembre del 2020.

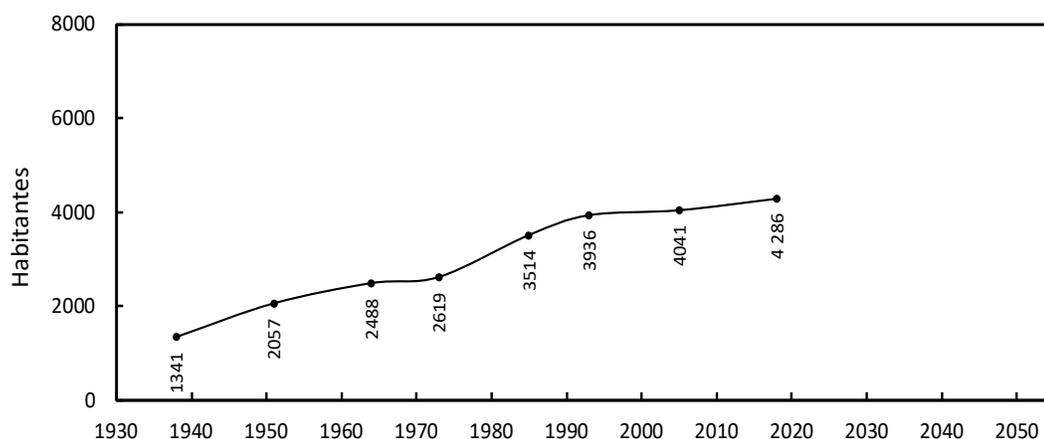


Figura 63. Censos de población Viotá – Cund., Cabecera Municipal. Fuente: DANE 2018.
Fuente: elaboración propia

A partir de los datos de la población censada, se calculan las tasas de crecimiento para la cabecera del municipio de Viotá, desde los años 2020 a 2045 (25 años, período de diseño establecido en el artículo 40 – Título 2 – Resolución MVCT 0330 de 2017), teniendo en cuenta para los casos de aritmético, geométrico, logarítmico, Wappus y Métodos por mínimos cuadrados.

6.1.1 Método del crecimiento lineal (crecimiento aritmético)

$$m = \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \text{ (Ec. 1)}$$

P_{uc} = Población Último Censo

P_{ci} = Población Censo Inicial

T_{uc} = Año último Censo

T_{ci} = Año Censo inicial

El método consiste en calcular la tasa m para la pareja de censos, dejando como pivote el censo del año 2018.

Tabla 58. Tasas de Crecimiento lineal. Cabecera Municipio de Viotá (hab/año)

Censos	2018- 1938	2018- 1951	2018- 1964	2018- 1973	2018- 1985	2018- 1993	2018- 2005
m	36.81	33.27	33.30	37.04	23.39	14.00	18.85

Fuente: elaboración propia

Obtenidas las tasas se aplica la siguiente ecuación para determinar la proyección P_{fi} , a partir de T_{fi} desde el año 2020 hasta el año 2045.

$$P_{fi} = P_{uc} + m(T_{uc} - T_{fi}) \quad (Ec. 2)$$

Los valores calculados para cada P_{fi} para un año específico T_{fi} , se promedian para obtener el valor proyectado para el año T_{fi} . A continuación, se presenta los resultados del método del crecimiento lineal para los años 2020, a 2045. En la tabla 64, se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045

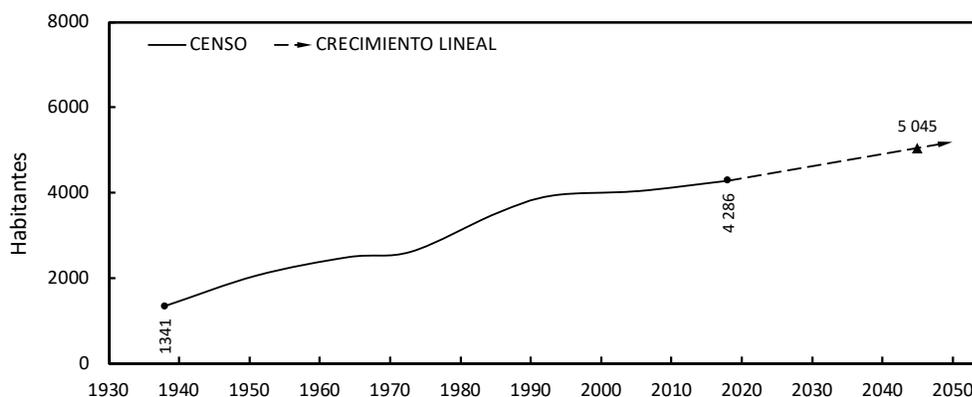


Figura 64. Proyección de población por crecimiento lineal – Cabecera Municipio de Viotá.

Fuente: elaboración propia

6.1.2 Método del crecimiento geométrico

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc} - T_{ci})}} - 1 \quad (Ec. 3)$$

P_{uc} = Población Último Censo

P_{ci} = Población Censo Inicial

T_{uc} = Año último Censo

T_{ci} = Año Censo inicial

El método consiste en calcular la tasa r para la pareja de censos, dejando como pivote el censo del año 2018.

Tabla 59. Tasas de crecimiento geométrico anual. Cabecera Municipio de Viotá

Censos	2018- 1938	2018- 1951	2018- 1964	2018- 1973	2018- 1985	2018- 1993	2018- 2005
r	0.0146	0.0110	0.0101	0.0110	0.0060	0.0034	0.0045

Fuente: elaboración propia

Obtenidas las tasas se aplica la siguiente ecuación para determinar la proyección P_{fi} , a partir de T_{fi} desde el año 2020 hasta el año 2045.

$$P_{fi} = P_{uc}(1 + r)^{(T_{uc}-T_{fi})} \quad (Ec. 4)$$

Los valores calculados para cada P_{fi} para un año específico T_{fi} , se promedian para obtener el valor proyectado para el año T_{fi} . A continuación, se presenta los resultados del método del crecimiento geométrico para los años 2020 a 2045. En la tabla 64, se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045.

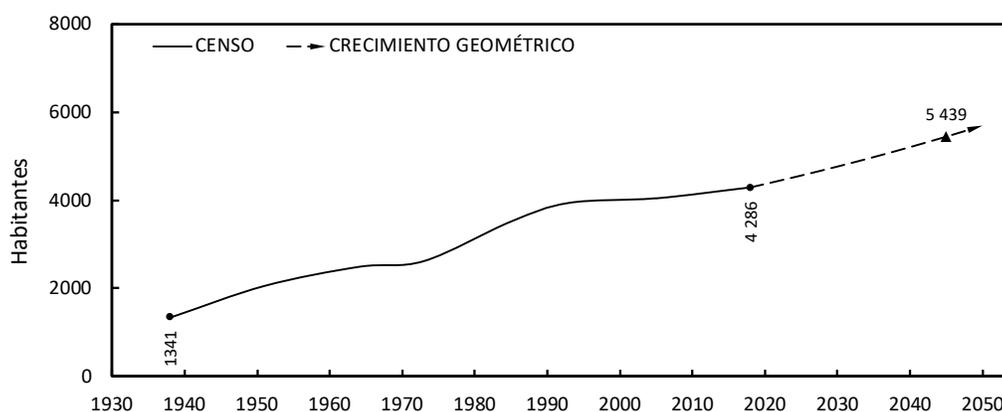


Figura 65. Proyección de población por crecimiento geométrico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

6.1.3 Método del crecimiento logarítmico

$$k_i = \frac{\ln(P_{CP}) - \ln(P_{CA})}{T_{uc} - T_{ci}} \quad (Ec. 5)$$

P_{CP} =Población Censo Siguiete i

P_{CA} = Población Censo Inicio

T_{uc} = Año Censo Siguiete a i

T_{ci} = Año Censo Inicio

El método consiste en calcular la tasa k para la pareja de censos consecutivos,

Tabla 60. Tasas de crecimiento logarítmico anual. Cabecera Municipio de Viotá

Censos	1938-	1951-	1964-	1973-	1985-	1993-	2005-
	1951	1964	1973	1985	1993	2005	2018
K _i	0.0329	0.0146	0.0057	0.0245	0.0142	0.0022	0.0045

Fuente: elaboración propia

Obtenidas las tasas se promedian las tasas k_i y mediante la siguiente ecuación se determina la proyección P_{fi} , a partir de T_{fi} desde el año 2020 hasta el año 2045

$$P_{fi} = P_{uc} \cdot e^{\bar{k}(T_{uc}-T_{fi})} \quad (Ec. 6)$$

Los valores calculados para cada P_{fi} para un año específico T_{fi} , se presenta los resultados del método del crecimiento logarítmico para los años 2020 a 2045. En la tabla 64, se presentan los valores para la serie de proyección 2019-2044.

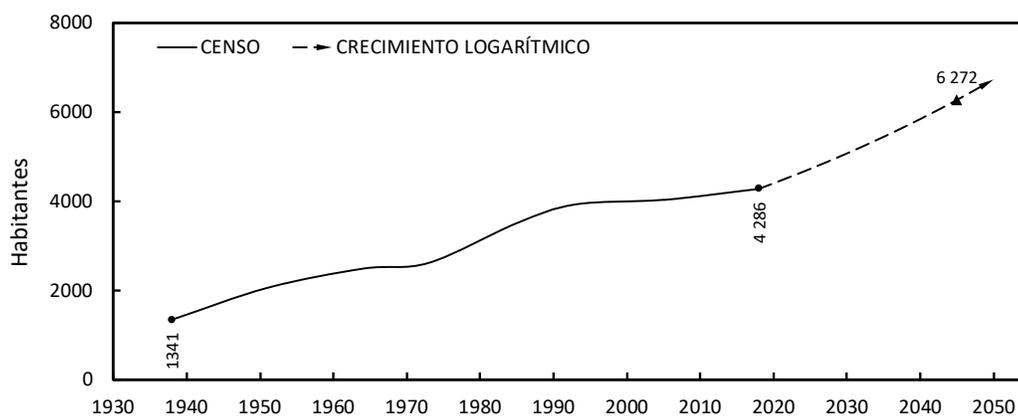


Figura 66. Proyección de población por crecimiento logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

6.1.4 Método wappus caso 1 (promedio proyecciones)

$$i = \frac{200(P_{UC} - P_{Ci})}{(T_f - T_{ci})(P_{UC} + P_{Ci})} \text{ (Ec. 7)}$$

P_{UC} =Población Censos Sigüientes

P_{Ci} = Población Censos Inicial

T_{ci} = Año Censo Inicial (1938)

T_f = Año Censos Sigüientes (1951, 1964, 1973,1985,1993,2005,2018)

El método consiste en calcular la tasa i para la pareja de censos pivoteados con el censo inicial del año 1938.

Tabla 61. Tasas de crecimiento Wappus anual. Cabecera Municipio de Viotá

Censos	1938- 1951	1938- 1964	1938- 1973	1938- 1985	1938- 1993	1938- 2005	1938- 2018
i_i	3.242	2.304	1.844	1.905	1.788	1.498	1.308

Fuente: elaboración propia

Obtenidas las tasas i_i y mediante la siguiente ecuación se determina la proyección P_{fi} , a partir de T_f desde el año 2020 hasta el año 2045 de los T_{ci} , para cada grupo de tasas i_i .

$$P_{fi} = P_{uc} \frac{200 + i(T_f - T_{ci})}{200 - i(T_f - T_{ci})} \quad (Ec. 8)$$

Los valores para cada P_{fi} para un año específico T_{ci} , se presenta los resultados del método del crecimiento Wappus para los años 2020, a 2045. En la tabla 64, se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045 promediada de proyecciones.

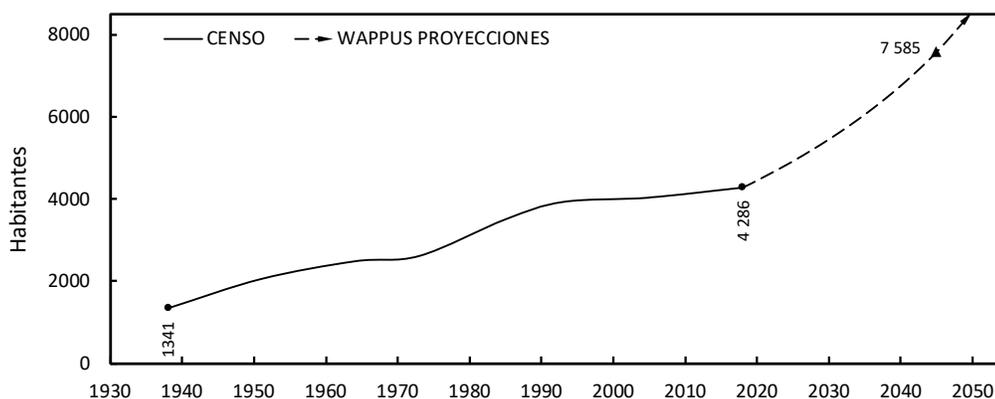


Figura 67. Proyección de población por crecimiento Wappus –Cabecera Municipio de Viotá.

Fuente: elaboración propia

6.1.5 Método wappus caso 2 (promedio tasas)

Tomado la ecuación 7 y los resultados presentados, se propone realizar el promedio aritmético de las tasas obtenidos, este resultado corresponde a:

Tabla 62. Tasas de crecimiento Wappus (Promedio Tasas) anual. Cabecera Municipio de Viotá

Censos	1938-1964	1938-1973	1938-1985	1938-1993	1938-2005	1938-2018	Promedio
i_i	3.242	2.304	1.844	1.905	1.788	1.498	1.775

Fuente: elaboración propia

Con la tasa i promedio se aplica en la ecuación 8 obteniéndose el siguiente resultado:

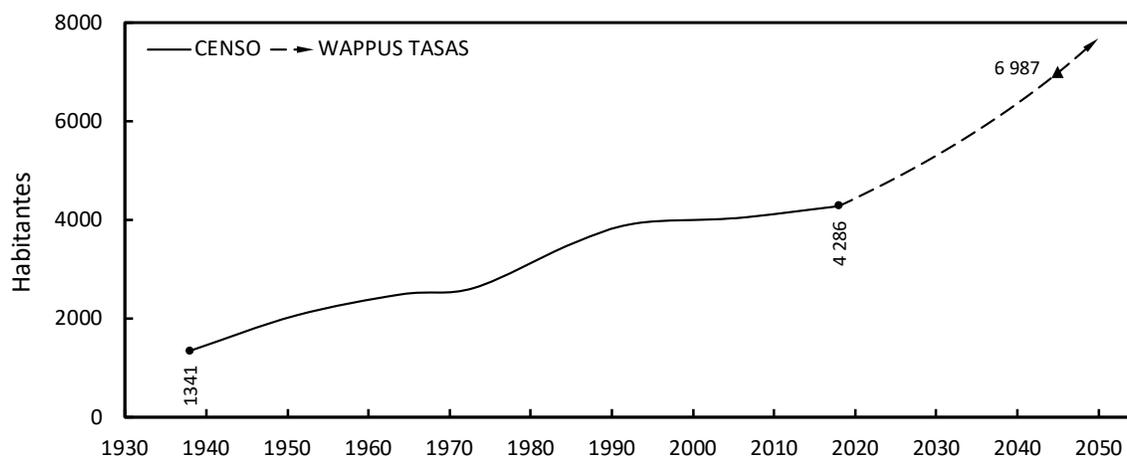


Figura 68. Proyección de población por crecimiento Wappus (Promedio Tasas) – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

6.1.6 Proyecciones por métodos de mínimos cuadrados

Al tener una serie de tiempo de la población se puede realizar la proyección de los valores de esta serie hacia adelante, teniendo en cuenta el método de los mínimos cuadrados, que permite ajustar una curva a los datos de la serie, en donde el error o diferencia del valor de la curva para cada uno de los valores de la serie, es el mínimo posible. Matemáticamente hablando corresponderá al lugar geométrico en donde los coeficientes C_1 y C_2 ajusten la curva para que la diferencia para cada pareja de valores de la serie versus la curva sea el menor.

Para el presente análisis se tomarán los casos de:

Lineal:

$$y = C_1x + C_2 \quad (\text{Ec. 9})$$

Logarítmico

$$y = C_1 \ln(x) + C_2 \quad (\text{Ec. 10})$$

Exponencial

$$y = C_2e^{C_1x} \quad (\text{Ec. 11})$$

Potencial

$$y = C_2 x^{C_1} \text{ (Ec. 12)}$$

De acuerdo con la metodología, se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 63. Coeficientes de ajuste por Mínimos Cuadrados

	R	R²	C₁	C₂
Lineal	0.980	0.961	38.427	-72988.59
Logarítmico	0.981	0.962	76046.78	-574155.90
Exponencial	0.958	0.919	0.01424	1.667321E-09
Potencial	0.960	0.921	28.200	3.167E-90

Fuente: elaboración propia

Donde el valor R², corresponde al coeficiente de correlación o de determinación de la curva de ajuste y mide que tan “ajustados” se encuentran con respecto a la muestra original (serie de tiempo), entre más cercano a 1.0, mejor ajustados son los valores a la muestra.

A continuación, se presentan los respectivos resultados para la metodología presentada y en la tabla 64, se presentan los valores para las series de proyección 2020-2045 con los anteriores métodos.

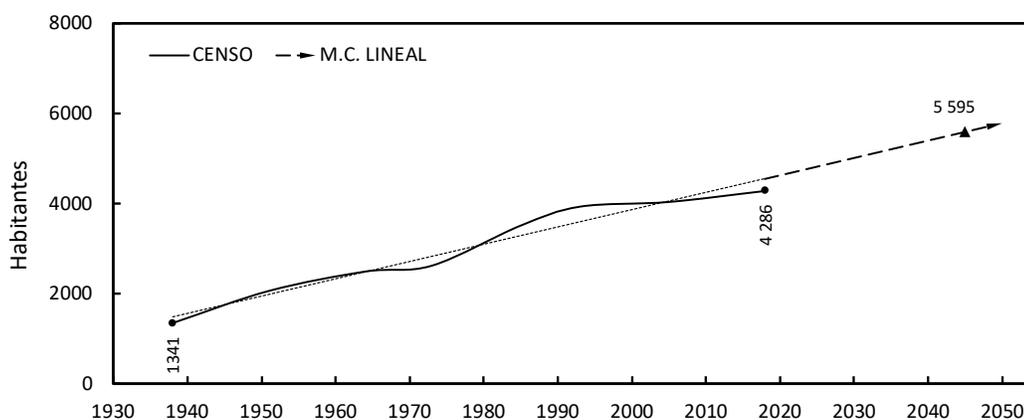


Figura 69. Proyección de población por M.C. caso lineal – Cabecera Municipio de Viotá.

Fuente: elaboración propia

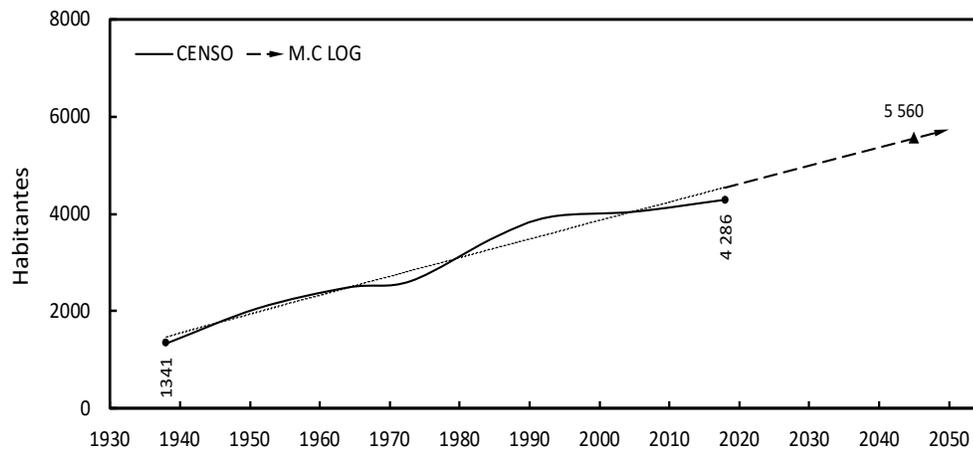


Figura 70. Proyección de población por M.C. caso logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

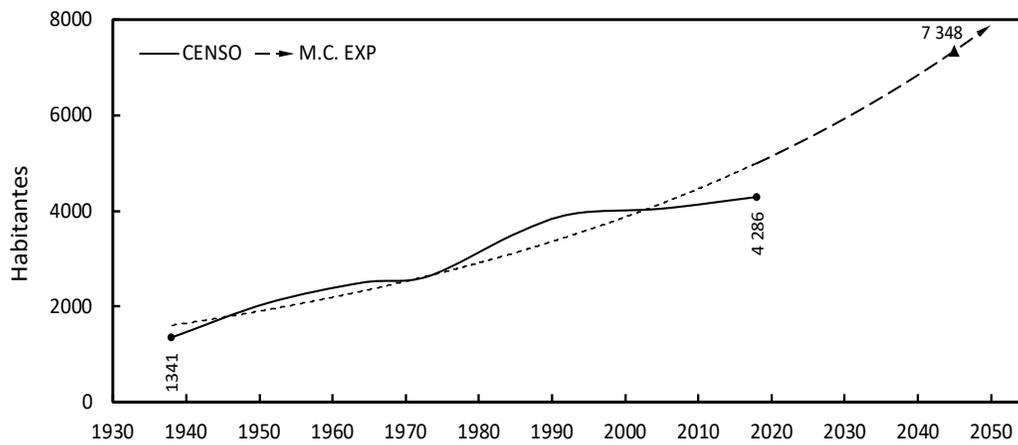


Figura 71. Proyección de población por M.C. caso Exponencial – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

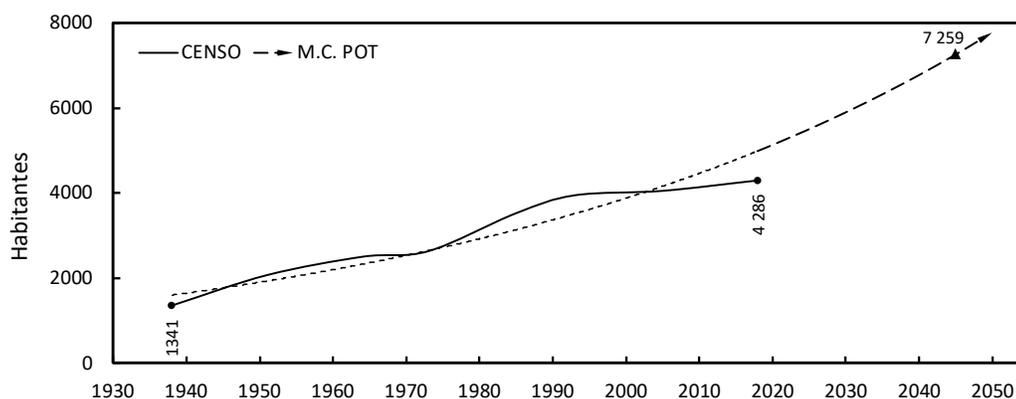


Figura 72. Proyección de población por M.C. caso Potencial – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

6.1.7 Resultados de las proyecciones

De acuerdo con las metodologías presentadas, a continuación, se presenta el resumen de las metodologías y se determina con el promedio aritmético entre ellas para presentar el resultado final y en la tabla 64, se presentan los valores para todas las series de proyección.

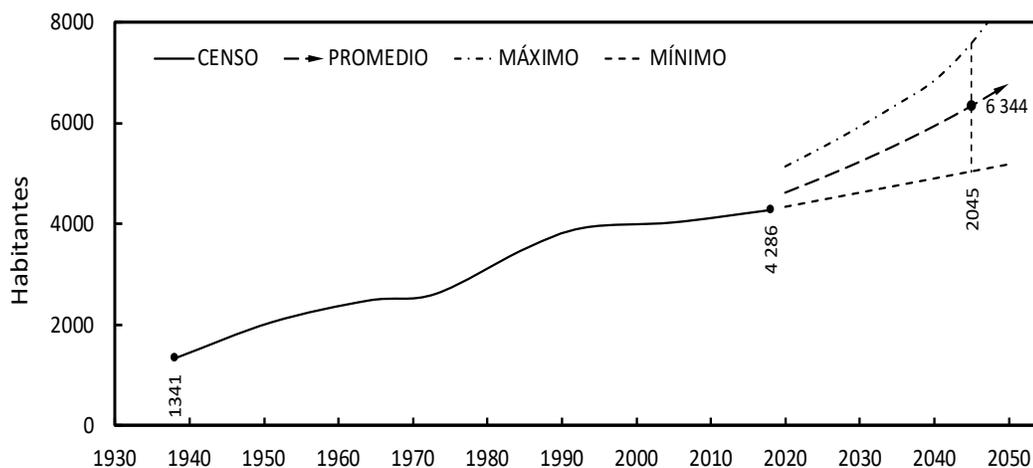


Figura 73. Resumen de métodos de proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá. Fuente: elaboración propia

Para determinar el rango de aplicación de los resultados presentados, se adopta el estadístico Z de Chauvenet, de tal forma que los valores obtenidos, estén dentro del siguiente rango:

$$\bar{X} \pm Z\sigma \text{ (Ec. 13)}$$

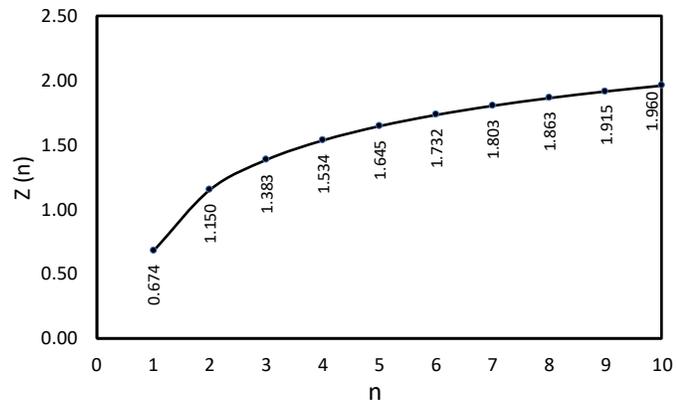


Figura 74. Estadístico de Chauvenet para valores de n datos. Fuente: elaboración propia

Donde:

\bar{X} = es el promedio de los valores para el año en cuestión.

σ = es la desviación estándar de los valores para el año en cuestión.

Z = es el estadístico de Chauvenet para la amplitud del rango en función del número de datos.

De presentarse algún valor por fuera del rango permisible, este no se tendrá en cuenta y se vuelve a realizar la verificación. De acuerdo con el criterio anterior no se obtuvieron valores por fuera de sus respectivos rangos. Ver la tabla 64.

Tabla 64. Resumen de métodos de proyección de población. Cabecera Municipio de Viotá

	C.LINEA L	C. GEOM.	C. LOG	WAPPUS 1	WAPPUS 2	M.C. LINEAL	M.C LOG	M.C. EXP	M.C. POT	σ	n	$\bar{X} - Z\sigma$	\bar{X}	$\bar{X} + Z\sigma$
2018	4 286	4 286	4 286	4 286	4 286	4 286	4 286	4 286	4 286				4 286	
2019	4 314	4 323	4 347	4 372	4 363	4 596	4 587	5 075	5 061	313	9	5 159	4 560	3 961
2020	4 342	4 361	4 409	4 460	4 441	4 635	4 625	5 148	5 132	317	9	5 223	4 617	4 011
2021	4 370	4 399	4 471	4 550	4 520	4 673	4 663	5 222	5 204	322	9	5 291	4 675	4 059
2022	4 398	4 437	4 535	4 641	4 602	4 712	4 700	5 296	5 277	328	9	5 361	4 733	4 105
2023	4 426	4 476	4 599	4 736	4 684	4 750	4 738	5 372	5 351	336	9	5 435	4 792	4 149
2024	4 455	4 515	4 664	4 832	4 768	4 789	4 775	5 449	5 426	345	9	5 513	4 853	4 193
2025	4 483	4 555	4 731	4 930	4 854	4 827	4 813	5 528	5 502	355	9	5 594	4 914	4 234
2026	4 511	4 595	4 798	5 031	4 941	4 865	4 850	5 607	5 579	367	9	5 678	4 975	4 272
2027	4 539	4 635	4 866	5 135	5 030	4 904	4 888	5 687	5 658	381	9	5 768	5 038	4 308
2028	4 567	4 676	4 935	5 241	5 121	4 942	4 926	5 769	5 737	396	9	5 859	5 101	4 343
2029	4 595	4 717	5 005	5 349	5 213	4 981	4 963	5 852	5 817	413	9	5 956	5 166	4 376
2030	4 623	4 759	5 076	5 461	5 308	5 019	5 000	5 935	5 899	431	9	6 056	5 231	4 406
2031	4 651	4 801	5 148	5 575	5 404	5 057	5 038	6 021	5 981	450	9	6 159	5 297	4 435
2032	4 679	4 843	5 221	5 693	5 502	5 096	5 075	6 107	6 065	472	9	6 268	5 365	4 462
2033	4 707	4 887	5 295	5 814	5 602	5 134	5 113	6 194	6 149	494	9	6 379	5 433	4 487
2034	4 736	4 930	5 371	5 938	5 705	5 173	5 150	6 283	6 235	519	9	6 495	5 502	4 509
2035	4 764	4 974	5 447	6 065	5 809	5 211	5 188	6 373	6 322	544	9	6 615	5 573	4 531
2036	4 792	5 018	5 524	6 197	5 916	5 250	5 225	6 465	6 410	572	9	6 738	5 644	4 550
2037	4 820	5 063	5 603	6 332	6 025	5 288	5 262	6 557	6 500	600	9	6 867	5 717	4 567
2038	4 848	5 108	5 682	6 472	6 136	5 326	5 300	6 651	6 590	631	9	6 998	5 790	4 582
2039	4 876	5 154	5 763	6 615	6 250	5 365	5 337	6 747	6 682	663	9	7 135	5 865	4 595
2040	4 904	5 201	5 845	6 764	6 366	5 403	5 374	6 844	6 775	697	9	7 276	5 942	4 608
2041	4 932	5 247	5 928	6 917	6 485	5 442	5 411	6 942	6 870	733	9	7 422	6 019	4 616
2042	4 960	5 295	6 012	7 076	6 606	5 480	5 449	7 041	6 965	770	9	7 572	6 098	4 624
2043	4 988	5 342	6 097	7 239	6 730	5 519	5 486	7 142	7 062	809	9	7 727	6 178	4 629
2044	5 016	5 391	6 184	7 409	6 857	5 557	5 523	7 245	7 160	850	9	7 888	6 260	4 632
2045	5 045	5 439	6 272	7 585	6 987	5 595	5 560	7 348	7 259	894	9	8 055	6 344	4 633
2050	5 185	5 691	6 730	8 571	7 686	5 788	5 746	7 891	7 777	1 144	9	8 975	6 785	4 595

6.1.8 Proyecciones de población municipio de Viotá

Tabla 65. Proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá. Años 2018 – 2044

	AÑOS	POBLACIÓN	Tasa
CENSOS	1938	1341	
	1951	2057	
	1964	2488	
	1973	2619	
	1985	3514	
	1993	3936	
	2005	4041	
	2018	4 286	
PROYECCIÓN	2020	4 617	0.0772
	2025	4 914	0.0643
	2030	5 231	0.0645
	2035	5 573	0.0654
	2040	5 942	0.0662
	2045	6 344	0.0677

Fuente: elaboración propia

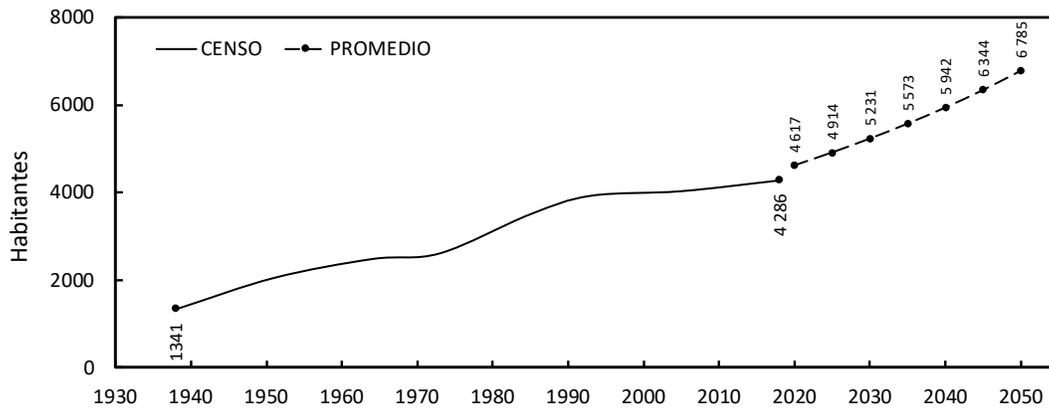


Figura 75. Curva de proyección población Cabecera Viotá. Fuente: elaboración propia

Con los datos obtenidos se establece una tasa de crecimiento quinquenal para la determinación del crecimiento poblacional, de tal forma que se pueda inferir los aumentos de caudales de descargas para los escenarios de condiciones futuras a modelar.

7 CAPÍTULO Estudio topobatimétrico²⁷

Para la construcción y diseño del modelo hidrodinámico se requirió de los datos geográficos digitales como las redes irregulares de triángulos (TIN) y para la importación de los datos geométricos se usó la extensión Hec-geoRAS en ArcGIS. Este capítulo describe la información utilizada para la creación de los datos geográficos.

7.1 Levantamiento topobatimétrico

El levantamiento de las secciones transversales fue por medio del equipo estación total, desde los puntos pertenecientes a la Red Geodésica y los puntos auxiliares; también, los detalles tanto naturales como artificiales que comprende el terreno.

Estos levantamientos topográficos se llevaron a cabo con cartera electrónica y codificando cada detalle de las secciones transversales previamente planeadas.

A continuación, se describe los equipos utilizados para el proceso de levantamiento en campo.

Tabla 66. Equipos utilizados en el levantamiento topobatimétrico

Descripción	Tipo y modelo
Equipo GPS L1/L2 GLONASS RTK	TRIMBLE R6-4
Equipo GPS L1/L2 RTK	TRIMBLE R6
Estación total	NIKON DTM 350

Fuente: CAR

7.2 Procesamiento de la información

La verificación de los datos obtenidos mediante la cartera de campo comparando la coincidencia en cantidad y calidad de la información de la cartera electrónica; calcularon las coordenadas de los puntos auxiliares y coordenadas para las radiaciones.

²⁷ CAR, (2015, septiembre). Ejecutar los estudios y diseños para realizar el manejo integral de la cuenca de Quebrada Pilama, Quebrada San Juan y Río Lindo en el departamento de Cundinamarca, Fase I. Bogotá D.C.

Exportaron todos los archivos de las coordenadas del levantamiento a un formato *.ASC; esta información fue filtrada dependiendo del modelo de datos, separando grupos de datos por capas con iguales descripciones, luego se exportaron a CAD.

La elaboración del plano se generó una nube de puntos, que es la posición verdadera que tienen todos y cada uno de los puntos tomados en campo, a partir del archivo de texto obtenido en el procesamiento de coordenadas. Estos datos se clasifican de acuerdo con la descripción de los puntos en un procesador de texto o una hoja de cálculo y se cargan en un programa de dibujo, en este caso AutoCAD. Ya en AutoCAD, se procede a la interpretación de las carteras de campo, uniendo mediante líneas y/o convenciones los puntos. Este procedimiento se realiza hasta unir de forma consistente todos los puntos.

El resultado es un conjunto de planos preliminares, los cuales pasa a un control por parte del ingeniero diseñador para su verificación. Una vez hecho el control de calidad se genera un plano definitivo para la presentación definitiva de la información. Luego se realiza el cálculo de los detalles radiados. Para tal fin se utiliza el software de Manejo de datos de la estación total, los cuales realizan los procedimientos adecuados para el cálculo de las coordenadas.

7.3 Redes irregulares de triángulos (TIN)

Una superficie de red irregular de triángulos (TIN) se puede generar a partir de mediciones de origen de superficie o mediante la conversión de otra superficie funcional en una superficie TIN²⁸.

En la figura 76 y figura 77 se muestra el TIN utilizado para el desarrollo del modelo hidráulico de la corriente principal y tributario.

²⁸ Esri, ArcGIS Pro. Crear una superficie TIN. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/tin/create-a-tin-surface.htm> del 10 de junio del 2021.

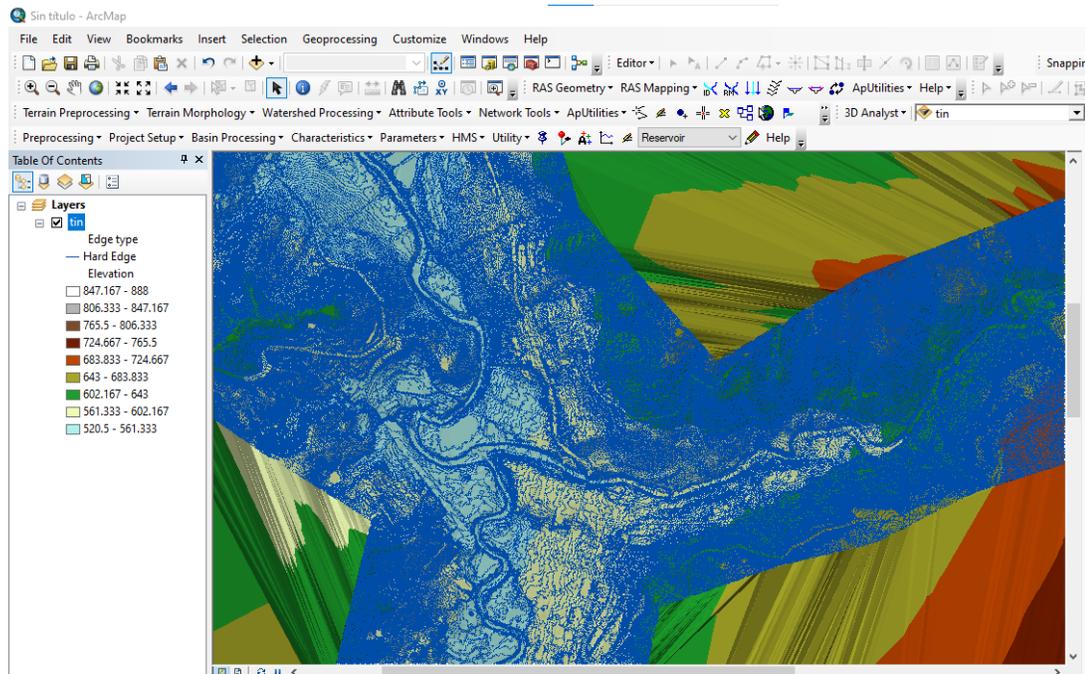


Figura 76. Redes irregulares de triángulos (TIN). Fuente: CAR, ArcMap 10.5

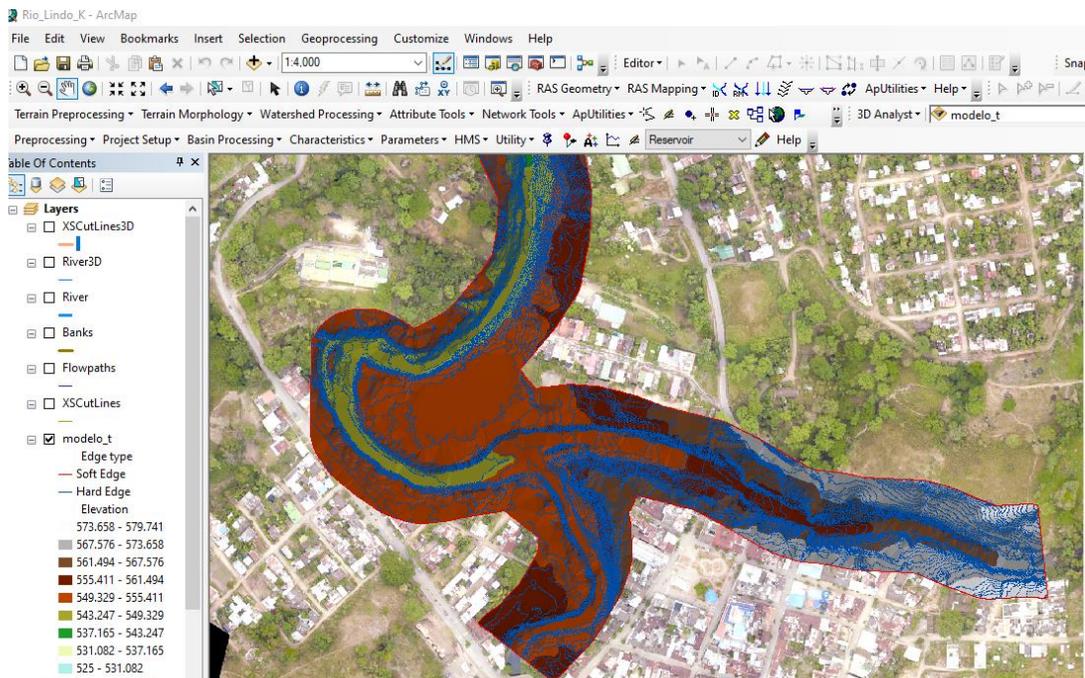


Figura 77. TIN recortado utilizado para la modelación. Fuente: CAR, ArcMap 10.5

8 CAPÍTULO Modelación: componente hidráulico

8.1 Desarrollo del modelo hidráulico

Para el desarrollo del modelo hidráulico del Río Lindo Y la Quebrada Pilama se utilizó la extensión Hec-geoRAS (Hydrological Engineering Center – Geospatial River Analysis System) para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center del United Army Corps of Engineering y el Environmental System Research Institute (ESRI).

Para el manejo de esta extensión se usó las redes irregulares de triángulos (TIN) de la zona de estudio. “Un TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos de interpolación para formar estos triángulos, como la triangulación de Delaunay o el orden de distancias. ArcGIS es compatible con el método de triangulación de Delaunay”²⁹.

Se debe cumplir una serie de procedimientos y diseños para procesar los datos georreferenciados que permita realizar la preparación de los datos geométricos, y así, Hec-geoRAS crea un archivo de importación a HEC-RAS que recoge toda la información de la geometría del terreno de estudio incluyendo el cauce principal el Río Lindo, el afluente la Quebrada Pilama, las secciones transversales a cada 5 metros, las bancas, entre otros. Ver figura 78.

²⁹ Que es una superficie TIN ArcMAP. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/> del 25 de febrero del 2021.

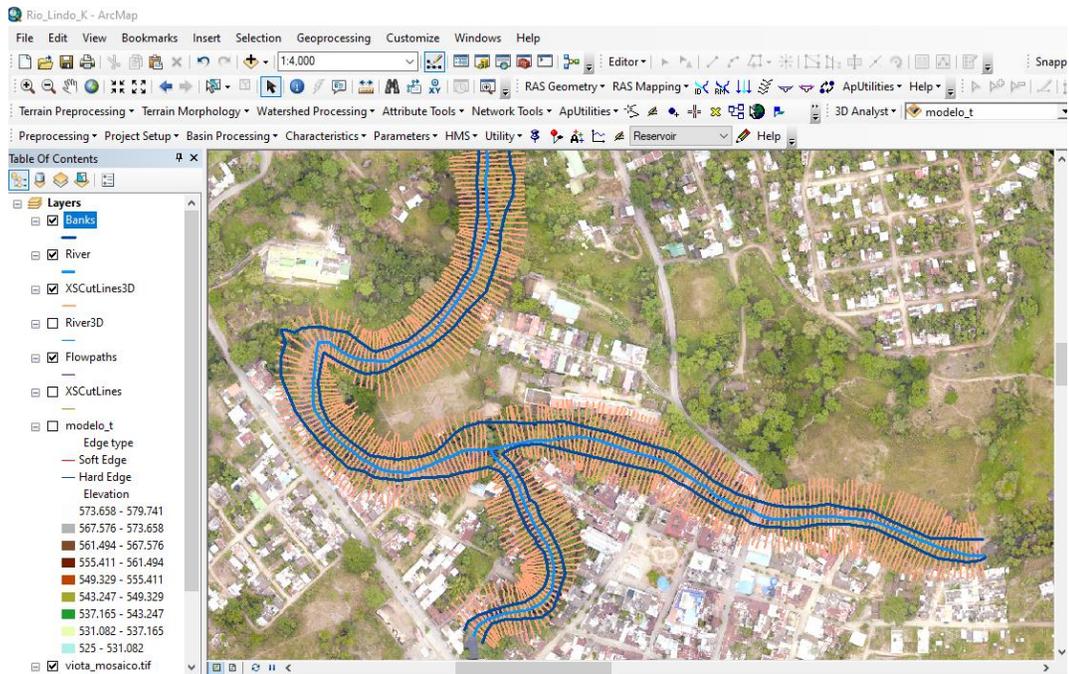


Figura 78. Secciones transversales, banca y eje del río. Fuente: ArcMap 10.5

Principalmente se inicia con la verificación de la geometría (ver figura 79) y se procede el ingreso de los datos faltantes al modelo hidráulico como la información del junct, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning tanto para las planicies de inundación de las márgenes izquierda y derecha, como del cauce principal. Luego se introduce las condiciones de contorno para cada tramo analizado; para la Quebrada Pilama y el Río Lindo 1 la condición de borde aguas arriba (Upstream) es la profundidad normal (Normal Depth) con el valor de la pendiente de 0.0434 y 0.0392, respectivamente y para el tramo después de la confluencia llamado Río Lindo 2 la condición de borde aguas abajo (Downstream) es profundidad normal con una pendiente de 0.0582. Ver figura 80.

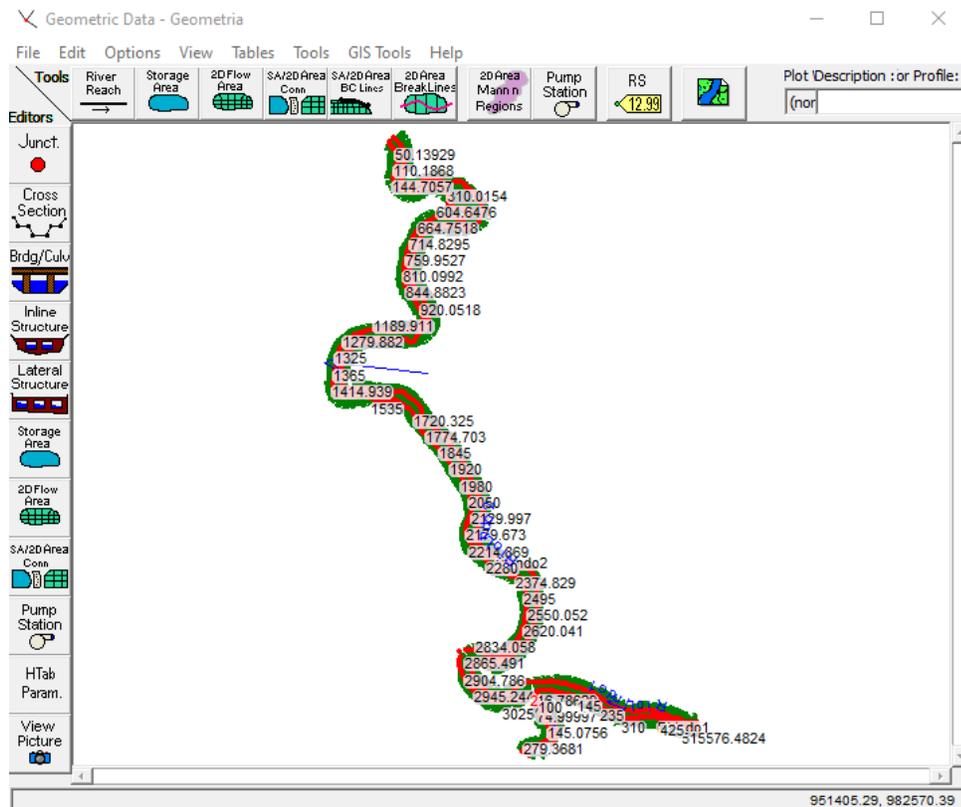


Figura 79. Geometría del río Lindo y quebrada Pilama. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Steady Flow Boundary Conditions

Set boundary for all profiles
 Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
QuebPilama	QPilama	all	Normal Depth S = 0.0434	Junction=2
RioLindo 1	RLindo 1	all	Normal Depth S = 0.0392	Junction=2
RioLindo2	RLindo2	all	Junction=2	Normal Depth S = 0.0582

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ...

Enter to accept data changes.

Figura 80. Condiciones de contorno. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Hec-Ras permite introducir cambios en los caudales en determinadas secciones transversales (Add a Flow Change Location), ya que el programa considera que el

caudal es el mismo aguas abajo hasta que se encuentre con otro valor en otra sección; para este caso, el tramo del río de estudio se localizaron diferentes descargas laterales de aguas residuales domésticas, estos caudales fueron sumados a la sección transversal correspondiente a su coordenada. A continuación, se define claramente la sección transversal con su respectivo caudal y descripción del lugar.

Tabla 67. Caudales y su respectiva sección transversal

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m³/s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.147	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.087	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 415.1173	0.0870326	Descarga 7
Río Lindo 1	K0 + 224.9999	0.0877493	Descarga 8
Río Lindo 2	K3 + 134.83	0.2347493	Confluencia
Río Lindo 2	K3 + 039.977	0.2360493	Descarga 10
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.3860493	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 605.012	0.3861408	Descarga 11
Río Lindo 2	K2 + 594.996	0.3868238	Descarga 12
Río Lindo 2	K2 + 100	0.4348238	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.4858238	Afluente lateral izquierda
Río Lindo 2	K1 + 350.292	0.486	Caudal zona PTAR

Fuente: elaboración propia

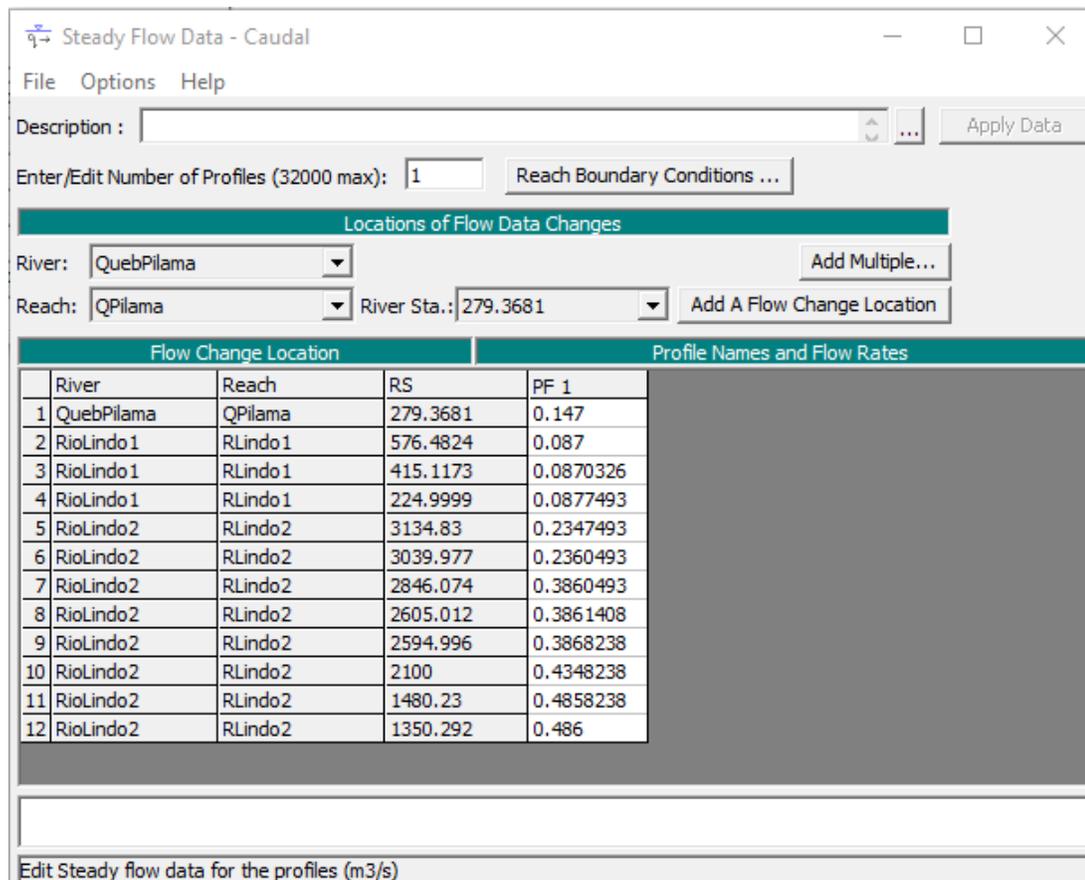


Figura 81. Caudales ingresados. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Para finalizar con el modelo hidráulico se crea un plan, se selecciona el régimen del flujo subcrítico y se ejecuta la simulación.

8.2 Calibración del modelo hidráulico

La calibración del modelo hidráulico consistió en ajustar el coeficiente de rugosidad de Manning del canal en el programa de tal manera que este sea capaz de simular la corriente del río con una alta confiabilidad.

Para este estudio, se tiene medido los parámetros en campo (caudal, velocidad media y la lámina del agua) en diferentes puntos de la corriente para concretar las características del río para su calibración.

A continuación, se describe las secciones transversales que se tuvieron en cuenta para la calibración (ver tabla 68) y en las figuras 82 a la 84 se observan las láminas de agua calculadas por el programa en cada sección de las corrientes.

Tabla 68. Secciones transversales para la calibración hidráulica

Tramo	Sección transversal HEC-RAS	Caudal medido (m ³ /s)	Lámina del agua observada (m)
Quebrada Pilama	K0 + 021.22	0.147	0.290
Río Lindo 1	K0 + 020.52	0.087	0.327
Río Lindo 2	K1 + 350.29	0.486	0.402

Fuente: elaboración propia

The screenshot shows the 'Cross Section Output' window with the following settings: River: QuebPilama, Profile: PF 1, Reach: QPilama, RS: 21.22079, Plan: Simulacion. The table below displays the simulation results for this section.

Plan: Simulacion QuebPilama QPilama RS: 21.22079 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	549.79	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.00	Wt. n-Val.		0.280	
W.S. Elev (m)	549.79	Reach Len. (m)	4.48	4.43	4.84
Crit W.S. (m)		Flow Area (m ²)		2.43	
E.G. Slope (m/m)	0.002026	Area (m ²)		2.43	
Q Total (m ³ /s)	0.15	Flow (m ³ /s)		0.15	
Top Width (m)	10.46	Top Width (m)		10.46	
Vel Total (m/s)	0.06	Avg. Vel. (m/s)		0.06	
Max Chl Dpth (m)	0.29	Hydr. Depth (m)		0.23	
Conv. Total (m ³ /s)	3.3	Conv. (m ³ /s)		3.3	
Length Wtd. (m)	4.43	Wetted Per. (m)		10.52	
Min Ch El (m)	549.50	Shear (N/m ²)		4.59	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		0.28	
Frctn Loss (m)	0.01	Cum Volume (1000 m ³)		0.05	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)		0.04	

Figura 82. Quebrada Pilama - Sección K0+021.22. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Cross Section Output

File Type Options Help

River: RioLindo1 Profile: PF 1

Reach: RLindo1 RS: 20.52606 Plan: Simulacion

Plan: Simulacion RioLindo1 RLindo1 RS: 20.52606 Profile: PF 1

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	550.32	Wt. n-Val.		0.510	
Vel Head (m)	0.00	Reach Len. (m)	4.09	4.69	8.49
W.S. Elev (m)	550.32	Flow Area (m2)		1.04	
Crit W.S. (m)		Area (m2)		1.04	
E.G. Slope (m/m)	0.014457	Flow (m3/s)		0.09	
Q Total (m3/s)	0.09	Top Width (m)		4.75	
Top Width (m)	4.75	Avg. Vel. (m/s)		0.08	
Vel Total (m/s)	0.08	Hydr. Depth (m)		0.22	
Max Chl Dpth (m)	0.32	Conv. (m3/s)		0.7	
Conv. Total (m3/s)	0.7	Wetted Per. (m)		4.82	
Length Wtd. (m)	4.69	Shear (N/m2)		30.50	
Min Ch El (m)	550.00	Stream Power (N/m s)		2.58	
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m3)		0.03	
Frctn Loss (m)	0.25	Cum SA (1000 m2)		0.02	
C & E Loss (m)	0.00				

Figura 83. Río Lindo 1 - Sección K0+020.53. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Cross Section Output

File Type Options Help

River: RioLindo2 Profile: PF 1

Reach: RLindo2 RS: 1350.292 Plan: Simulacion

Plan: Simulacion RioLindo2 RLindo2 RS: 1350.292 Profile: PF 1

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	534.40	Wt. n-Val.		0.170	
Vel Head (m)	0.00	Reach Len. (m)	5.13	5.22	5.39
W.S. Elev (m)	534.40	Flow Area (m2)		2.61	
Crit W.S. (m)		Area (m2)		2.61	
E.G. Slope (m/m)	0.007067	Flow (m3/s)		0.49	
Q Total (m3/s)	0.49	Top Width (m)		11.28	
Top Width (m)	11.28	Avg. Vel. (m/s)		0.19	
Vel Total (m/s)	0.19	Hydr. Depth (m)		0.23	
Max Chl Dpth (m)	0.40	Conv. (m3/s)		5.8	
Conv. Total (m3/s)	5.8	Wetted Per. (m)		11.32	
Length Wtd. (m)	5.22	Shear (N/m2)		16.00	
Min Ch El (m)	534.00	Stream Power (N/m s)		2.98	
Alpha	1.00	Cum Volume (1000 m3)		6.02	
Frctn Loss (m)	0.05	Cum SA (1000 m2)		17.29	
C & E Loss (m)	0.00				

Figura 84. Río Lindo 2 - Sección K1+350.29. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Finalmente, el modelo hidráulico calibrado, en la figura 80 se muestra el perfil del tramo río Lindo 1 y en la tabla 66 se describe su comportamiento de las distintas características hidráulicas de los resultados obtenidos de la modelación de la corriente de agua como el caudal (Q. total), entre las elevaciones comprende fondo del cauce (Min Ch El), superficie del agua (W.S. Elev) y la línea de energía (E.G.

Elev) y entre las características del canal pendiente longitudinal del fondo (Invert Slope), máxima profundidad del flujo (Max Chal Dpth), velocidad media (Vel Total), área hidráulica de la sección (Flow Area), ancho superficial (Top Width), coeficiente de rugosidad de Manning del canal (Mann Wtd Chnl) y número de Froude (Froude # Chl).

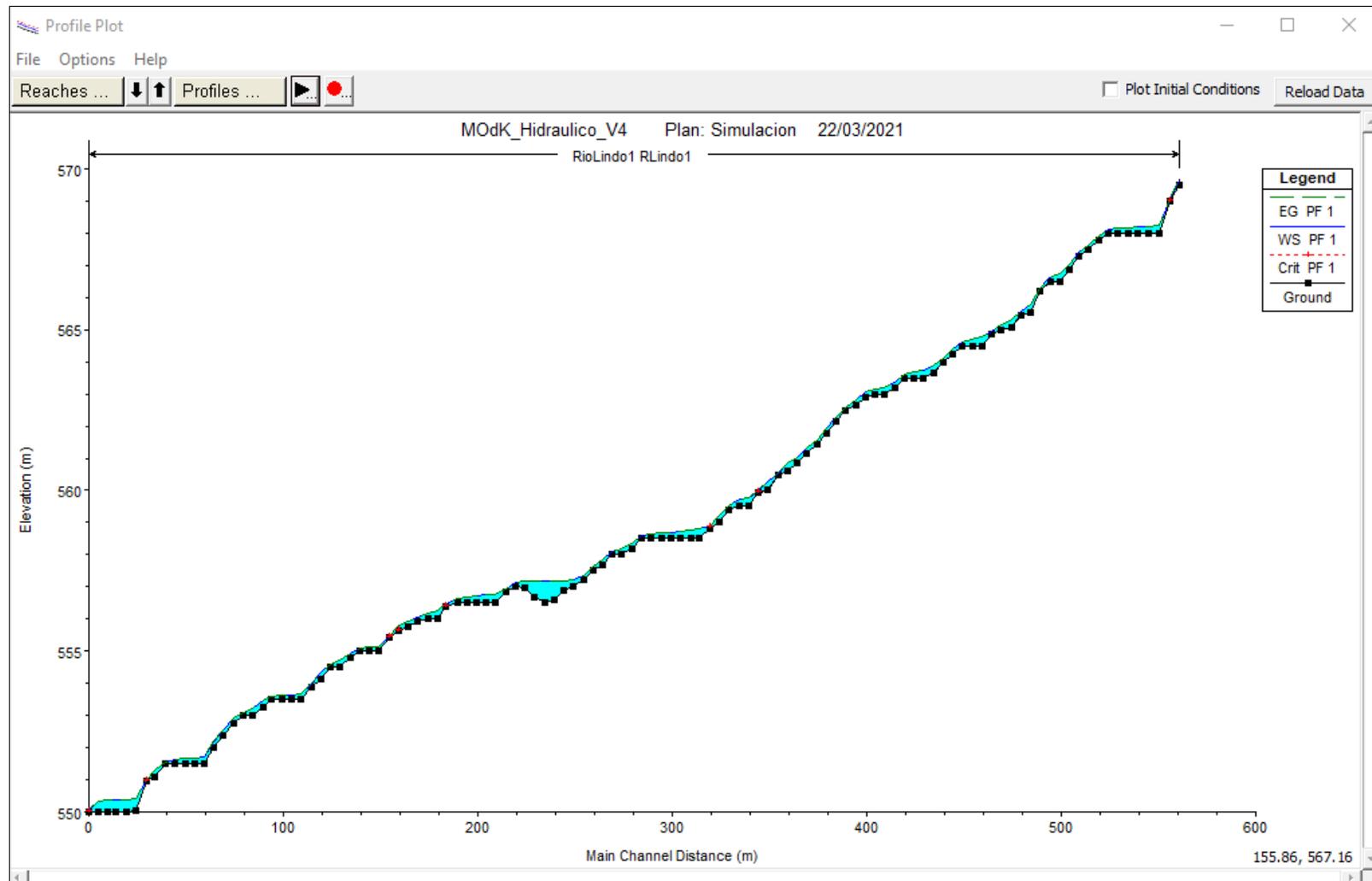


Figura 85. Perfil del tramo Río Lindo 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Tabla 69. Resultados de la modelación hidráulica tramo río Lindo 1

TRAMO RÍO LINDO 1											
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL PROGRAMA HEC-RAS											
Sec. Nº	Caudal (m ³ /s)	Elevaciones				Características Hidráulicas					
		Fondo del Cauce	Superficie del Agua	Línea de Energía	Pendiente Longitudinal del fondo	Máxima profundidad del flujo (y)	Velocidad Media	Área Hidráulica de la Sección	Ancho Superficial (T)	Coefficiente Manning del canal	Número de Froude
		m.s.n.m	m.s.n.m	m.s.n.m	m / m	m	m / s	m ²	m	-	-
576.48	0.09	569.50	569.66	569.66	0.105	0.16	0.10	0.88	6.07	0.51	0.08
571.53	0.09	568.98	569.05	569.07	0.189	0.07	0.63	0.14	3.44	0.51	1.00
566.35	0.09	568.00	568.24	568.24	0.000	0.24	0.05	1.77	10.41	0.51	0.04
560.88	0.09	568.00	568.22	568.22	0.000	0.22	0.03	2.66	12.99	0.51	0.02
555.35	0.09	568.00	568.20	568.20	0.000	0.20	0.04	2.41	12.35	0.51	0.03
550.07	0.09	568.00	568.18	568.18	0.000	0.18	0.04	2.08	11.73	0.51	0.03
545.11	0.09	568.00	568.16	568.16	0.000	0.16	0.04	1.98	13.25	0.51	0.04
540.07	0.09	568.00	568.11	568.11	0.039	0.11	0.06	1.52	14.85	0.51	0.06
534.94	0.09	567.80	567.92	567.93	0.060	0.12	0.10	0.85	12.57	0.51	0.13
529.89	0.09	567.50	567.63	567.63	0.045	0.13	0.07	1.17	13.79	0.51	0.08
524.74	0.09	567.27	567.42	567.42	0.084	0.15	0.08	1.03	11.04	0.51	0.09
520.00	0.09	566.87	567.05	567.05	0.074	0.18	0.12	0.74	13.42	0.51	0.16
515.00	0.09	566.50	566.74	566.74	0.000	0.24	0.09	0.98	7.79	0.51	0.08
510.00	0.09	566.50	566.61	566.61	0.060	0.11	0.06	1.38	13.09	0.51	0.06
505.00	0.09	566.20	566.28	566.29	0.130	0.08	0.24	0.36	7.98	0.51	0.37
500.00	0.09	565.55	565.80	565.80	0.020	0.25	0.09	0.94	7.19	0.51	0.08
495.00	0.09	565.45	565.58	565.58	0.076	0.13	0.09	0.95	11.51	0.51	0.10
490.00	0.09	565.07	565.28	565.29	0.014	0.21	0.11	0.79	6.94	0.51	0.10
485.00	0.09	565.00	565.15	565.15	0.030	0.15	0.07	1.29	9.19	0.51	0.06
480.00	0.09	564.85	564.95	564.95	0.070	0.10	0.16	0.55	7.64	0.51	0.19
475.00	0.09	564.50	564.78	564.78	0.000	0.28	0.07	1.21	6.53	0.51	0.05
470.00	0.09	564.50	564.71	564.71	0.000	0.21	0.07	1.19	7.06	0.51	0.06
465.00	0.09	564.50	564.60	564.60	0.053	0.10	0.08	1.11	11.15	0.51	0.08
459.90	0.09	564.23	564.40	564.40	0.046	0.17	0.09	0.96	8.95	0.51	0.09
454.93	0.09	564.00	564.09	564.09	0.071	0.09	0.12	0.72	8.35	0.51	0.13
450.00	0.09	563.65	563.86	563.86	0.030	0.21	0.08	1.07	8.72	0.51	0.07
445.00	0.09	563.50	563.76	563.76	0.000	0.26	0.07	1.24	8.07	0.51	0.06

TRAMO RÍO LINDO 1											
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL PROGRAMA HEC-RAS											
Sec. Nº	Caudal (m ³ /s)	Elevaciones				Características Hidráulicas					
		Fondo del Cauce	Superficie del Agua	Línea de Energía	Pendiente Longitudinal del fondo	Máxima profundidad del flujo (y)	Velocidad Media	Área Hidráulica de la Sección	Ancho Superficial (T)	Coefficiente Manning del canal	Número de Froude
		m.s.n.m	m.s.n.m	m.s.n.m	m / m	m	m / s	m ²	m	-	-
440.00	0.09	563.50	563.69	563.69	0.000	0.19	0.05	1.60	11.25	0.51	0.05
435.00	0.09	563.50	563.62	563.62	0.058	0.12	0.07	1.30	12.36	0.51	0.07
430.00	0.09	563.21	563.35	563.35	0.042	0.14	0.16	0.53	6.80	0.51	0.19
425.00	0.09	563.00	563.20	563.20	0.000	0.20	0.06	1.46	9.32	0.51	0.05
420.00	0.09	563.00	563.15	563.15	0.016	0.15	0.05	1.64	11.60	0.51	0.05
415.12	0.09	562.92	563.05	563.05	0.052	0.13	0.08	1.08	13.82	0.51	0.09
410.11	0.09	562.66	562.82	562.82	0.031	0.16	0.09	1.01	10.66	0.51	0.09
405.00	0.09	562.50	562.59	562.59	0.068	0.09	0.08	1.06	12.54	0.51	0.09
400.00	0.09	562.16	562.29	562.29	0.074	0.13	0.11	0.82	9.47	0.51	0.12
395.00	0.09	561.79	561.94	561.94	0.068	0.15	0.10	0.85	8.93	0.51	0.11
390.00	0.09	561.45	561.57	561.57	0.060	0.12	0.10	0.87	12.26	0.51	0.12
385.00	0.09	561.15	561.32	561.32	0.056	0.17	0.09	1.01	8.67	0.51	0.08
380.00	0.09	560.87	561.03	561.03	0.055	0.16	0.12	0.71	8.88	0.51	0.14
375.26	0.09	560.61	560.85	560.85	0.022	0.24	0.07	1.20	8.62	0.51	0.06
370.25	0.09	560.50	560.54	560.55	0.089	0.04	0.26	0.34	8.20	0.51	0.41
364.62	0.09	560.00	560.27	560.27	0.013	0.27	0.07	1.27	8.28	0.51	0.06
359.97	0.09	559.94	559.99	560.00	0.092	0.05	0.56	0.16	5.51	0.51	1.06
355.17	0.09	559.50	559.77	559.77	0.000	0.27	0.07	1.27	6.83	0.51	0.05
350.09	0.09	559.50	559.71	559.71	0.019	0.21	0.07	1.30	7.13	0.51	0.05
344.82	0.09	559.40	559.50	559.51	0.086	0.10	0.27	0.32	8.26	0.51	0.44
340.16	0.09	559.00	559.24	559.24	0.037	0.24	0.07	1.18	7.89	0.51	0.06
335.06	0.09	558.81	558.89	558.91	0.059	0.08	0.60	0.14	3.32	0.51	0.93
329.79	0.09	558.50	558.79	558.79	0.000	0.29	0.03	3.08	12.87	0.51	0.02
325.24	0.09	558.50	558.78	558.78	0.000	0.28	0.05	1.61	6.88	0.51	0.04
319.98	0.09	558.50	558.74	558.74	0.000	0.24	0.07	1.31	5.54	0.51	0.04
315.03	0.09	558.50	558.70	558.70	0.000	0.20	0.06	1.46	7.37	0.51	0.04
310.00	0.09	558.50	558.67	558.67	0.000	0.17	0.04	2.21	13.41	0.51	0.03
305.00	0.09	558.50	558.65	558.65	0.000	0.15	0.04	2.18	15.28	0.51	0.03
300.17	0.09	558.50	558.59	558.59	0.063	0.09	0.07	1.32	14.30	0.51	0.07
294.93	0.09	558.17	558.33	558.33	0.033	0.16	0.13	0.67	7.95	0.51	0.14

TRAMO RÍO LINDO 1											
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL PROGRAMA HEC-RAS											
Sec. Nº	Caudal (m³/s)	Elevaciones				Características Hidráulicas					
		Fondo del Cauce	Superficie del Agua	Línea de Energía	Pendiente Longitudinal del fondo	Máxima profundidad del flujo (y)	Velocidad Media	Área Hidráulica de la Sección	Ancho Superficial (T)	Coefficiente Manning del canal	Número de Froude
		m.s.n.m	m.s.n.m	m.s.n.m	m / m	m	m / s	m²	m	-	-
289.82	0.09	558.00	558.20	558.20	0.000	0.20	0.06	1.47	9.30	0.51	0.05
284.94	0.09	558.00	558.11	558.11	0.061	0.11	0.08	1.05	10.38	0.51	0.08
280.02	0.09	557.70	557.85	557.85	0.042	0.15	0.11	0.79	9.02	0.51	0.12
275.19	0.09	557.50	557.64	557.64	0.054	0.14	0.08	1.12	9.62	0.51	0.07
269.99	0.09	557.22	557.36	557.37	0.045	0.14	0.14	0.63	7.94	0.51	0.16
265.10	0.09	557.00	557.22	557.22	0.018	0.22	0.06	1.41	9.21	0.51	0.05
259.66	0.09	556.90	557.19	557.19	0.064	0.29	0.04	2.40	11.77	0.51	0.03
255.00	0.09	556.60	557.19	557.19	0.020	0.59	0.02	5.58	13.06	0.51	0.01
250.00	0.09	556.50	557.19	557.19	-0.034	0.69	0.01	8.23	14.10	0.51	0.00
245.00	0.09	556.67	557.19	557.19	-0.061	0.52	0.02	5.45	13.90	0.51	0.01
239.95	0.09	556.98	557.19	557.19	-0.004	0.21	0.05	1.81	9.81	0.51	0.04
235.00	0.09	557.00	557.14	557.14	0.028	0.14	0.06	1.35	9.55	0.51	0.05
230.00	0.09	556.86	556.92	556.92	0.072	0.05	0.21	0.42	9.47	0.51	0.31
225.00	0.09	556.50	556.78	556.78	0.000	0.28	0.06	1.50	8.30	0.51	0.04
220.00	0.09	556.50	556.74	556.74	0.000	0.24	0.05	1.89	9.33	0.51	0.03
215.00	0.09	556.50	556.72	556.72	0.000	0.22	0.04	1.99	10.46	0.51	0.03
209.99	0.09	556.50	556.69	556.69	0.000	0.19	0.06	1.52	9.50	0.51	0.05
205.29	0.09	556.50	556.64	556.64	0.021	0.14	0.05	1.73	13.41	0.51	0.04
199.60	0.09	556.38	556.49	556.49	0.077	0.11	0.13	0.68	10.92	0.51	0.17
194.91	0.09	556.02	556.27	556.27	0.004	0.25	0.08	1.11	7.87	0.51	0.07
190.00	0.09	556.00	556.17	556.17	0.018	0.17	0.06	1.39	12.08	0.51	0.06
185.00	0.09	555.91	556.07	556.07	0.028	0.16	0.05	1.60	18.04	0.51	0.06
180.00	0.09	555.77	555.95	555.95	0.028	0.18	0.07	1.24	13.94	0.51	0.08
175.00	0.09	555.63	555.82	555.82	0.044	0.19	0.06	1.49	14.42	0.51	0.06
170.00	0.09	555.41	555.47	555.48	0.082	0.06	0.52	0.17	5.84	0.51	0.99
165.00	0.09	555.00	555.15	555.15	0.000	0.15	0.03	2.63	18.52	0.51	0.03
160.00	0.09	555.00	555.13	555.13	0.000	0.13	0.03	2.66	21.61	0.51	0.03
155.00	0.09	555.00	555.09	555.09	0.042	0.09	0.04	2.08	23.20	0.51	0.04
150.00	0.09	554.79	554.91	554.91	0.058	0.12	0.22	0.39	6.63	0.51	0.29
145.00	0.09	554.50	554.74	554.74	0.000	0.24	0.05	1.60	12.00	0.51	0.05

TRAMO RÍO LINDO 1											
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL PROGRAMA HEC-RAS											
Sec. Nº	Caudal (m ³ /s)	Elevaciones				Características Hidráulicas					
		Fondo del Cauce	Superficie del Agua	Línea de Energía	Pendiente Longitudinal del fondo	Máxima profundidad del flujo (y)	Velocidad Media	Área Hidráulica de la Sección	Ancho Superficial (T)	Coefficiente Manning del canal	Número de Froude
		m.s.n.m	m.s.n.m	m.s.n.m	m / m	m	m / s	m ²	m	-	-
140.00	0.09	554.50	554.59	554.59	0.076	0.09	0.13	0.66	10.16	0.51	0.17
135.00	0.09	554.12	554.36	554.36	0.044	0.24	0.07	1.23	9.63	0.51	0.06
130.00	0.09	553.90	553.99	554.00	0.080	0.09	0.53	0.17	3.73	0.51	0.80
125.02	0.09	553.50	553.68	553.68	0.000	0.18	0.05	1.64	17.70	0.51	0.06
120.00	0.09	553.50	553.65	553.65	0.000	0.15	0.03	2.85	19.42	0.51	0.03
115.00	0.09	553.50	553.63	553.63	0.000	0.13	0.03	2.52	19.82	0.51	0.03
109.85	0.09	553.50	553.59	553.59	0.059	0.09	0.05	1.76	20.53	0.51	0.05
105.45	0.09	553.24	553.46	553.46	0.044	0.22	0.09	0.96	11.22	0.51	0.10
100.04	0.09	553.00	553.22	553.22	0.000	0.22	0.09	1.01	9.06	0.51	0.08
94.93	0.09	553.00	553.10	553.10	0.051	0.10	0.05	1.80	22.04	0.51	0.05
90.00	0.09	552.75	552.94	552.94	0.072	0.19	0.11	0.80	8.62	0.51	0.12
85.00	0.09	552.39	552.56	552.57	0.078	0.17	0.10	0.91	11.89	0.51	0.11
80.00	0.09	552.00	552.19	552.19	0.100	0.19	0.12	0.74	7.13	0.51	0.12
74.98	0.09	551.50	551.69	551.69	0.000	0.19	0.18	0.49	3.91	0.51	0.16
70.13	0.09	551.50	551.66	551.66	0.000	0.16	0.03	3.49	22.72	0.51	0.02
65.18	0.09	551.50	551.65	551.65	0.000	0.15	0.03	3.12	21.09	0.51	0.02
59.76	0.09	551.50	551.63	551.63	0.000	0.13	0.04	2.27	18.01	0.51	0.03
55.03	0.09	551.50	551.53	551.53	0.081	0.03	0.17	0.52	16.88	0.51	0.31
49.96	0.09	551.09	551.29	551.29	0.028	0.20	0.06	1.40	10.74	0.51	0.06
45.32	0.09	550.96	551.01	551.02	0.169	0.05	0.39	0.22	11.91	0.51	0.92
39.87	0.09	550.04	550.41	550.41	0.008	0.37	0.08	1.07	4.69	0.51	0.05
35.13	0.09	550.00	550.39	550.39	0.000	0.39	0.04	2.17	6.46	0.51	0.02
29.93	0.09	550.00	550.38	550.38	0.000	0.38	0.05	1.67	5.55	0.51	0.03
25.44	0.09	550.00	550.36	550.36	0.000	0.36	0.06	1.38	5.03	0.51	0.04
20.53	0.09	550.00	550.32	550.32	0.000	0.32	0.08	1.04	4.75	0.51	0.06
15.83	0.09	550.00	550.05	550.06	0.032	0.05	0.57	0.15	5.06	0.51	1.04

Fuente: elaboración propia

9 CAPÍTULO Modelación de calidad del agua: HEC-RAS

Luego de obtener toda la información necesaria, se procede a construir el modelo computacional del río Lindo, haciendo uso del programa HEC-RAS y sus herramientas de modelación hidráulica de flujo permanente no uniforme y de calidad del agua.

9.1 Datos para el modelo

A continuación, se describe detalladamente los datos geométricos, meteorológicos y de calidad del agua requeridos por el programa.

9.1.1 Datos geométricos e hidrodinámicos

Este modelo comprende con una longitud del cauce principal de 3711.31 metros dividido en dos tramos río Lindo 1 y río Lindo 2, conformando por 113 y 527 secciones transversales, respectivamente y la quebrada Pilama con 54 secciones y una longitud 279.37 metros.

9.1.2 Datos meteorológicos³⁰

La información climatológica fue recopilada de la estación más cercana y activa a la zona de estudio, además posee los datos suficientes para la modelación.

Esta estación corresponde a la Corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) y se llama Esc. Samper Madrid. Se encuentra ubicada en el municipio de Apulo, su categoría es climática principal (CP), tecnología convencional y su fecha de instalación es el 15 de marzo de 1987.

Tabla 70. Características de la estación Esc. Samper Madrid

Código	Tipo	Nombre	Elevación (m.s.n.m)	Norte (m)	Este (m)
21206410	CP	Esc. Samper Madrid	550	949146	986408

Fuente: elaboración propia

³⁰ Corporación autónoma regional de Cundinamarca. Recuperado de <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524> del 10 de febrero de 2021.

Los parámetros meteorológicos requeridos para este modelo son presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, radiación, nubosidad y la velocidad del viento.

Tabla 71. Parámetros de la estación Esc. Samper Madrid

Parámetros	Valor	Unidad
Presión atmosférica	693.658	mmHg
Temperatura del aire	26.6	°C
Humedad relativa	71	%
Radiación solar	157	cal/cm ²
Nubosidad	0.3	fracción de 0-1
Velocidad del viento	0.8	m/seg.

Fuente: elaboración propia

9.1.3 Datos de calidad del agua

La modelación de calidad del agua presente se enfocó solamente en los parámetros de oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBOC).

Los datos de entrada (Inputs) para el modelo de calidad del agua del río Lindo, fueron obtenidos por medio de la toma de muestra en el cauce principal, siguiendo la masa de agua de acuerdo con los horarios determinados por el tiempo de viaje.

En el estudio presente se aplicó las siguientes ecuaciones para el cálculo del coeficiente de reaireación (K_2) y para determinar la constante de desoxigenación (K_1) se utilizó el método matemático logarítmico con base en las mediciones de la DBO en el laboratorio.

Usando los datos de la geometría obtenida del aforo en el tramo río Lindo 1 en la sección transversal K0+420 una velocidad media de 0.079 m/s y una profundidad media de 0.462 metros se obtuvo el coeficiente de reaireación.

$$K_2 = \frac{1.923 v^{0.273}}{H^{0.894}} \text{ (ec. de Texas)}$$

Esta ecuación puede usarse en ríos con profundidades someras (0.2 m a 1.0 m) y con velocidades bajas menores a 0.3 m/s.

$$K_2 = \frac{5.34 v^{0.67}}{H^{1.85}} \text{ (ec. de Owens)}$$

Esta ecuación puede usarse en ríos con profundidades (0.12 m a 0.73 m) y velocidades (0.03 m/s a 0.55 m/s)

Donde:

v es la velocidad media del flujo (m/s)

H es la profundidad media del flujo (m)

$$K_2 = \frac{1.923 (0.079)^{0.273}}{(0.462)^{0.894}} \text{ (ec. de Texas)}$$

$$K_2 = 1.918 \text{ día}^{-1}$$

Para determinar el coeficiente desoxigenación se recomienda el uso de la información obtenida en campo debido que el K_1 es propia para cada recurso hídrico; este coeficiente es indispensable para definir la conducta de la DBO en el tiempo. Se calculó el valor de r y ln r, como se presenta en la siguiente tabla 72. Los datos tomados para este cálculo son del punto de muestreo 5 del tramo río Lindo 2 en la sección transversal K2+594.99.

Tabla 72. Cálculos para determinar coeficiente desoxigenación

Fecha	DBOC	Δt	$r = \frac{(Y_n - Y_{n-1})}{\Delta t}$	Ln r
08/08/18	11.649	5	2.329	0.846
21/08/18	27.66	13	1.223	0.209
03/09/18	60.66	26	1.264	0.238

Fuente: elaboración propia

Con la información de la tabla 72, se realizó una gráfica Ln r vs tiempo para diferentes valores de DBO y la pendiente de la recta corresponde al coeficiente de desoxigenación.

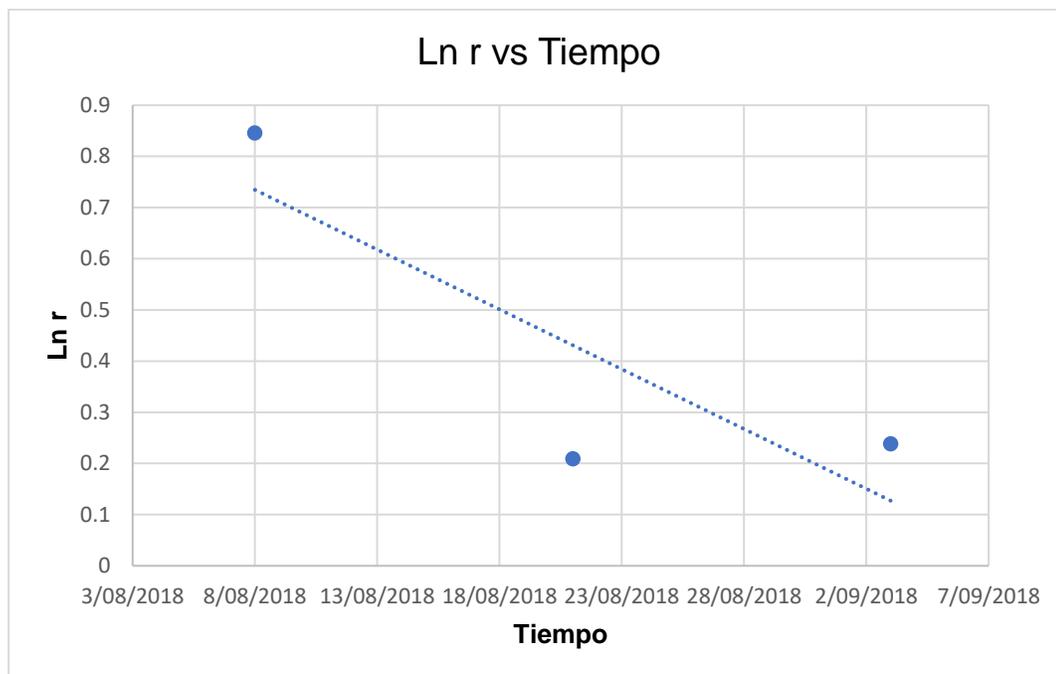


Figura 86. Gráfica Ln r vs tiempo. Fuente: elaboración propia

Se obtiene un valor de 0.0234 día^{-1} para el punto de muestreo 5 y aplicando el mismo procedimiento para el punto de muestreo 1 con los datos de laboratorio se calcula un coeficiente K_1 de 0.0381 día^{-1} .

Como resultado de lo aplicado anteriormente se obtuvo los siguientes valores para la constantes K_2 con los datos de campo.

Tabla 73. Coeficientes de reaireación

Tramo	Sección transversal HEC-RAS	Ecuación de Owens (día^{-1})	Ecuación de Texas (día^{-1})
Queb. Pilama	K0 + 021.22	9.298	2.867
Río Lindo 1	K0 + 420.00	4.068	1.918
Río Lindo 1	K0 + 020.52	6.834	2.487
Río Lindo 2	K1 + 350.29	8.407	2.629

Fuente: elaboración propia

10 CAPÍTULO Modelación: componente calidad

10.1 Desarrollo del modelo de calidad del agua

Creado el modelo hidráulico y calibrado, se procede a construir el modelo de calidad del agua, se crea un nuevo proyecto para la modelación de los nutrientes y se introduce los datos requeridos por HEC-RAS QUALITY.

Primero se debe introducir la longitud de la celda de calidad del agua inicialmente 100 metros y completar las condiciones de contorno aguas arriba y algunas entradas laterales; estas ubicaciones se establecieron a partir de los resultados de la modelación hidráulica.

Este estudio, se empleó un valor constante para la introducción de los datos requeridos como la temperatura, oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno última carbonácea (DBOC); también, para las condiciones iniciales de cada parámetro mencionado anteriormente.

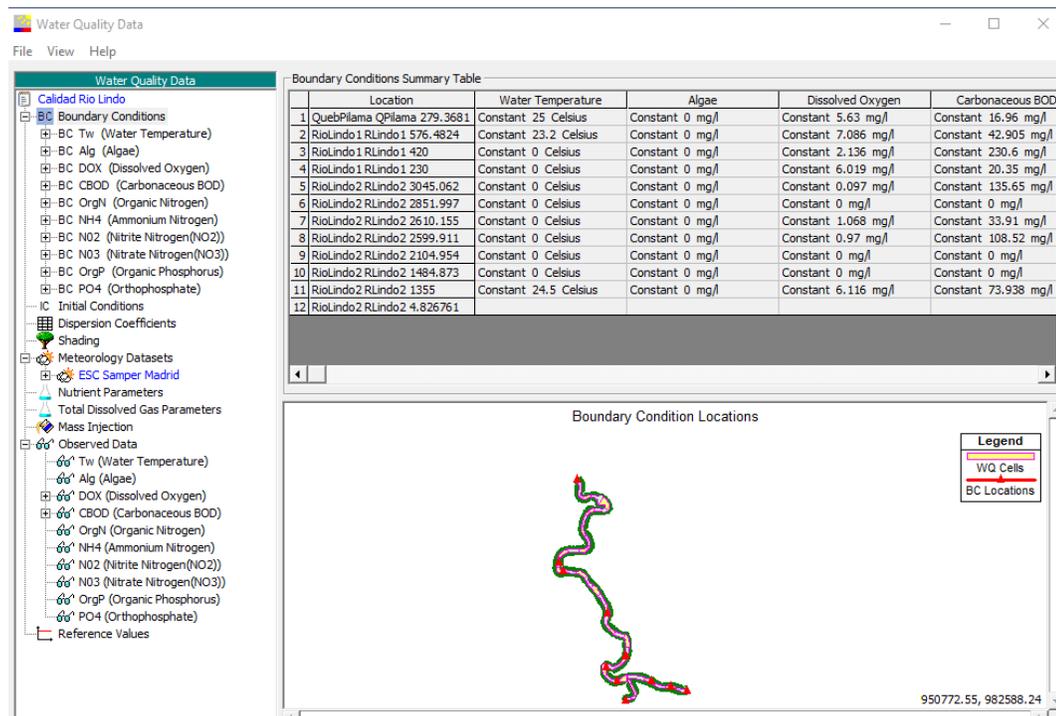


Figura 87. Condiciones de contorno. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Se completa los coeficientes de dispersión calculados previamente para el cauce principal y el afluente (ver tabla 74), luego en Meteorology Datasets, se crea una nueva estación llamada ESC Samper Madrid y se introduce la información requerida por el programa como elevación, latitud, longitud, coordenadas norte y este, presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, radiación y nubosidad y velocidad del viento; como se mencionó anteriormente son valores constantes del mismo día de la toma de muestras. Ver figura 88.

Tabla 74. Coeficientes de dispersión longitudinal

Corriente	Sección transversal	Coefficiente de dispersión (m ² /s)
Q. Pilama	K0+279.36	0.047
Río Lindo 1	K0+576.48	0.38
Río Lindo 2	K3+134.83	0.27
Río Lindo 2	K1+350.29	0.239

Fuente: elaboración propia

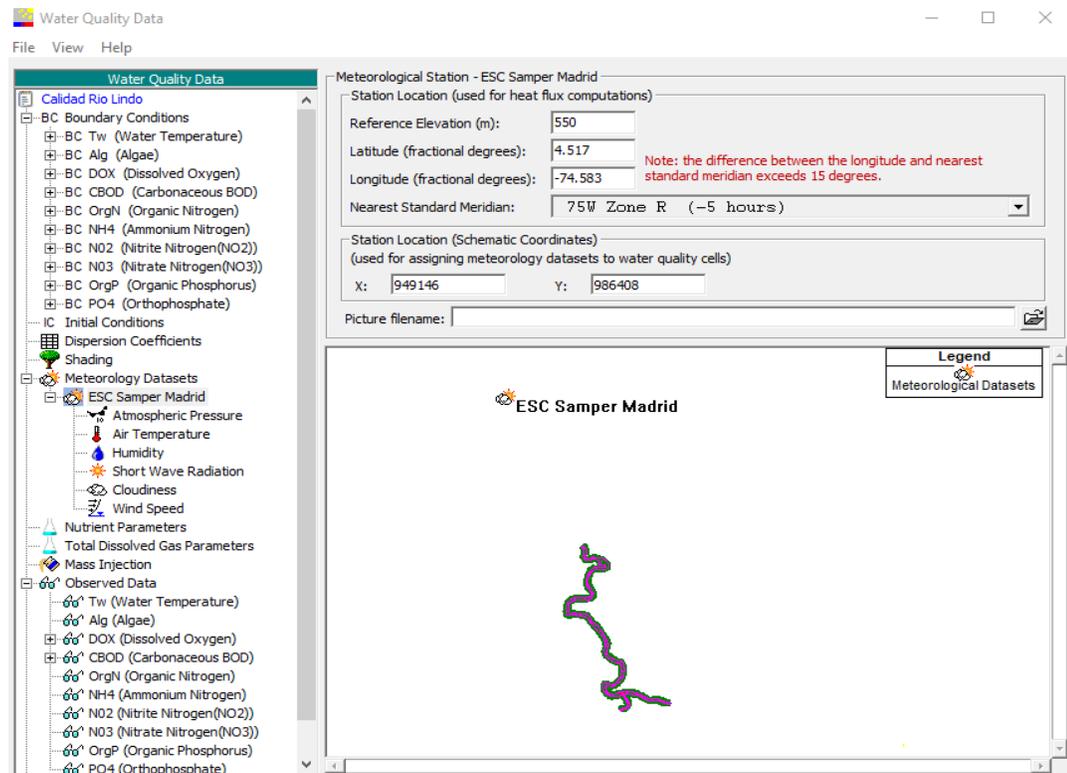


Figura 88. Estación meteorológica ESC. Samper Madrid. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

En parámetros de nutrientes, el coeficiente de desoxigenación (K_1) y coeficiente de reaireación (K_2) se estimó por medio de ecuaciones con las características e información del río y de los datos obtenidos en laboratorio, en cuanto a la tasa de pérdida de DBOC por sedimentos (K_3) y consumo béntico de oxígeno (K_4) se utilizó los rangos sugeridos por el programa.

Tabla 75. Valores iniciales de los parámetros del modelo

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor inicial
K_1	Coeficiente de desoxigenación	día ⁻¹	0.024
K_2	Coeficiente de reaireación	día ⁻¹	1.918
K_3	Tasa de pérdida de DBOC por sedimentos	día ⁻¹	0
K_4	Consumo béntico de oxígeno	día ⁻¹	1.2

Fuente: elaboración propia

Para finalizar, se ejecutó la simulación con fecha de inicio y final el 1 de agosto del 2018 con horas de las 0000 hasta las 2400.

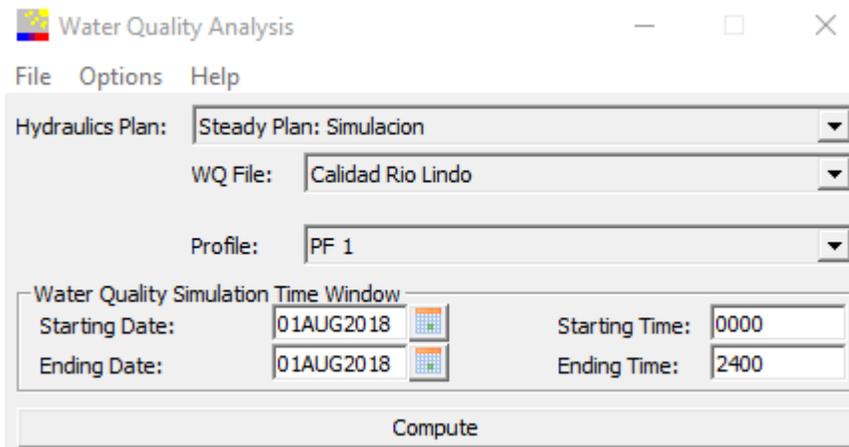


Figura 89. Simulación del modelo de calidad del agua. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

10.2 Calibración del modelo calidad

La calibración del modelo de calidad del agua del río Lindo se realizó mediante un proceso de ajuste de los parámetros de nutrientes, se visualizó los coeficientes de mayor importancia que inciden en los parámetros a simular.

El proceso se llevó a cabo manualmente por prueba y error, es decir, se hicieron múltiples corridas con diferentes valores en los coeficientes de tal manera que sea capaz de simular la calidad del agua en la corriente con una alta confiabilidad.

Se ajustaron cuatro coeficientes para poder comparar los resultados de la simulación con los datos obtenidos en la campaña de muestreo, en otras palabras, es lograr la mayor coincidencia entre estos datos.

Para comparar los datos calculados, se tuvo en cuenta los puntos de muestreo 1, 2, 3 y 4 a lo largo del cauce, en cuanto a los puntos 5 y 6 no se utilizaron debido a que se encontraron tres afluentes aguas abajo del río Lindo que no se le realizó toma de muestra en campo para determinar sus concentraciones de OD y DBOC.

Tabla 76. Punto de muestreo y su respectiva ubicación en el programa

Punto de muestreo	Corriente	Sección transversal HEC-RAS	OD medido (mg/L)	DBOC medido (mg/L)
P.1	Río Lindo 1	K0 + 576.48	7.086	42.905
P.2	Río Lindo 1	K0 + 035.13	7.1836	51.794
P.3	Río Lindo 2	K3 + 105.32	5.727	50.294
P.4	Río Lindo 2	K2 + 945.24	6.601	47.339

Fuente: elaboración propia

Para identificar el mejor ajuste posible de la calibración de los parámetros OD y DBOC, se determinó la diferencia entre los valores calculados y medidos, y así calcular el porcentaje de error para cada punto de muestreo. A continuación, se describe la ecuación aplicada.

$$\%Error = \frac{Valor_{medido} - Valor_{calculado}}{Valor_{medido}} * 100$$

Para calibrar los parámetros de la DBOC y OD se modificó el coeficiente de desoxigenación (K_1), la tasa de pérdida de DBOC por sedimentos (K_3), coeficiente de reaeración (K_2) y consumo béntico de oxígeno (K_4). Se realizó 78 corridas en el programa para la calibración del modelo, iniciando con el coeficiente K_1 constante y el coeficiente K_3 lo modificaba con valores de mayor y menor, luego observaba su comportamiento si aumentaba o disminuía el promedio de error de los seis puntos de muestreo, después se realizaba el mismo procedimiento, pero al revés K_3 contante su valor y el coeficiente K_1 se modificaba. Para calibrar el OD se realizó lo mismo iniciando el valor constante del coeficiente K_2 y cambiar el valor del coeficiente K_4 e igualmente al revés. Para finalizar, se observa el error promedio de los resultados de cada corrida y se elige el menor promedio obtenido.

Además de esto, se cambió el tamaño de la celda para la simulación con una longitud de 120 metros que inicialmente era 100 metros. Luego de ajustar la celda de calidad del agua, los parámetros se acercaron a los valores medidos de las diferentes corridas. Ver anexo 3

A continuación, en las siguientes tablas se muestra la comparación de los datos obtenidos cambiando la longitud de celda.

Tabla 77. Resultados de la DBOC cambiando la longitud de la celda

		Simulación 1		Simulación 2	
		K_1	0.03	K_1	0.03
		K_3	0	K_3	0
Punto	DBOC medida mg/L	DBOC calculada mg/L	% Error	DBOC calculada mg/L	% Error
1	42.9	42.89	0.02	42.88	0.05
2	51.79	42.38	18.17	42.79	17.38
3	50.29	26.47	47.37	26.57	47.17
4	47.34	26.5	44.02	26.55	43.92
		Error Prom.	27.40	Error Prom.	27.13

Fuente: elaboración propia

Tabla 78. Resultados del OD cambiando la longitud de la celda

		Simulación 1		Simulación 2	
		K_2	1.9	K_2	1.9
		K_4	0.3	K_4	0.3
Punto	OD medida mg/L	OD calculada mg/L	% Error	OD calculada mg/L	% Error
1	7.09	7.05	0.56	7.04	0.71
2	7.18	6.9	3.90	6.92	3.62
3	5.73	6.14	7.16	6.14	7.16
4	6.60	6.14	6.97	6.14	6.97
		Error Prom.	4.65	Error Prom.	4.61

Fuente: elaboración propia

Se puede observar en las tablas 79 y 80 los porcentajes de error para cada una de las variables, lo que significa que los coeficientes del OD son los más apropiados para la calibración del modelo porque se logró un promedio de error muy bajo del 4.61%, por lo contrario, la DBOC presenta un porcentaje de error no tan bajo con un promedio del 27.13%.

Tabla 79. Porcentaje de error de la calibración del oxígeno disuelto

Punto de muestreo	Valor medido OD (mg/L)	Valor calculado OD (mg/L)	% Error
P.1	7.09	7.04	0.71
P.2	7.18	6.92	3.62
P.3	5.73	6.14	7.16
P.4	6.60	6.14	6.97

Fuente: elaboración propia

Tabla 80. Porcentaje de error de la calibración de la DBOC

Punto de muestreo	Valor medido DBOC (mg/L)	Valor calculado DBOC (mg/L)	% Error
P.1	42.90	42.88	0.05
P.2	51.79	42.79	17.38
P.3	50.29	26.57	47.17
P.4	47.34	26.55	43.92

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan los valores de los coeficientes de la calibración de calidad del agua para el Río Lindo, en cuanto a la tasa de pérdida de DBOC por sedimentos (K_3), se analizó que el mejor valor es cero.

Tabla 81. Parámetros de calibración ajustado para la simulación de calidad del agua

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor inicial	Valor ajustado
K₁	Coeficiente de desoxigenación	día ⁻¹	0.024	0.030
K₂	Coeficiente de reaireación	día ⁻¹	1.918	1.9
K₃	Tasa de pérdida de DBOC por sedimentos	día ⁻¹	0	0
K₄	Consumo béntico de oxígeno	día ⁻¹	1.2	0.3

Fuente: elaboración propia

En las figuras 90 a la 95 se presentan las comparaciones entre los datos medidos en campo y los datos calculados por el modelo de calidad del agua en el programa HEC-RAS para las variables de OD y DBOC.

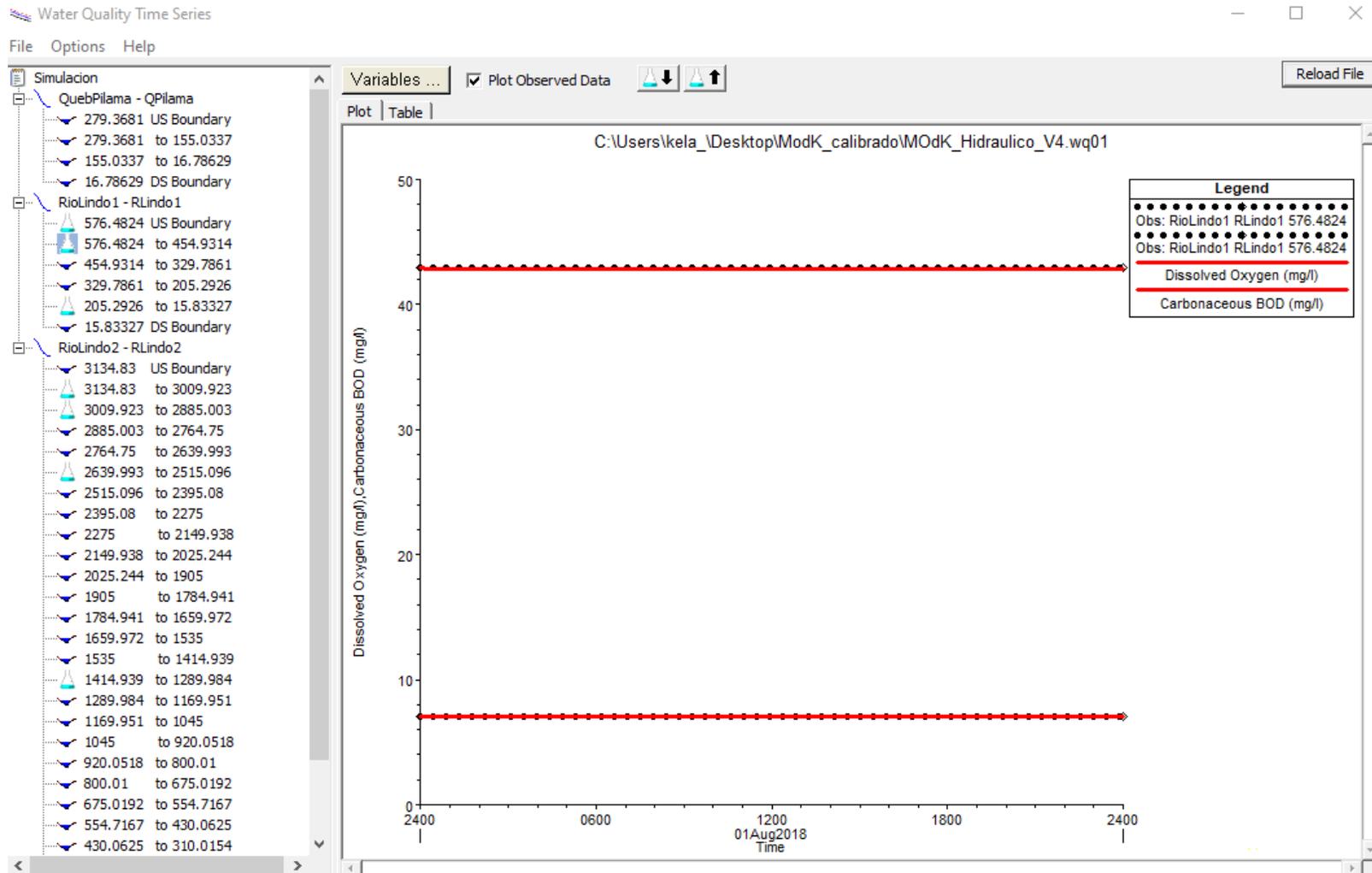


Figura 90. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 1, punto de muestreo 1 entre las secciones transversales K0+576.48 al K0+475.0 Fuente: HEC-RAS 5.0.6

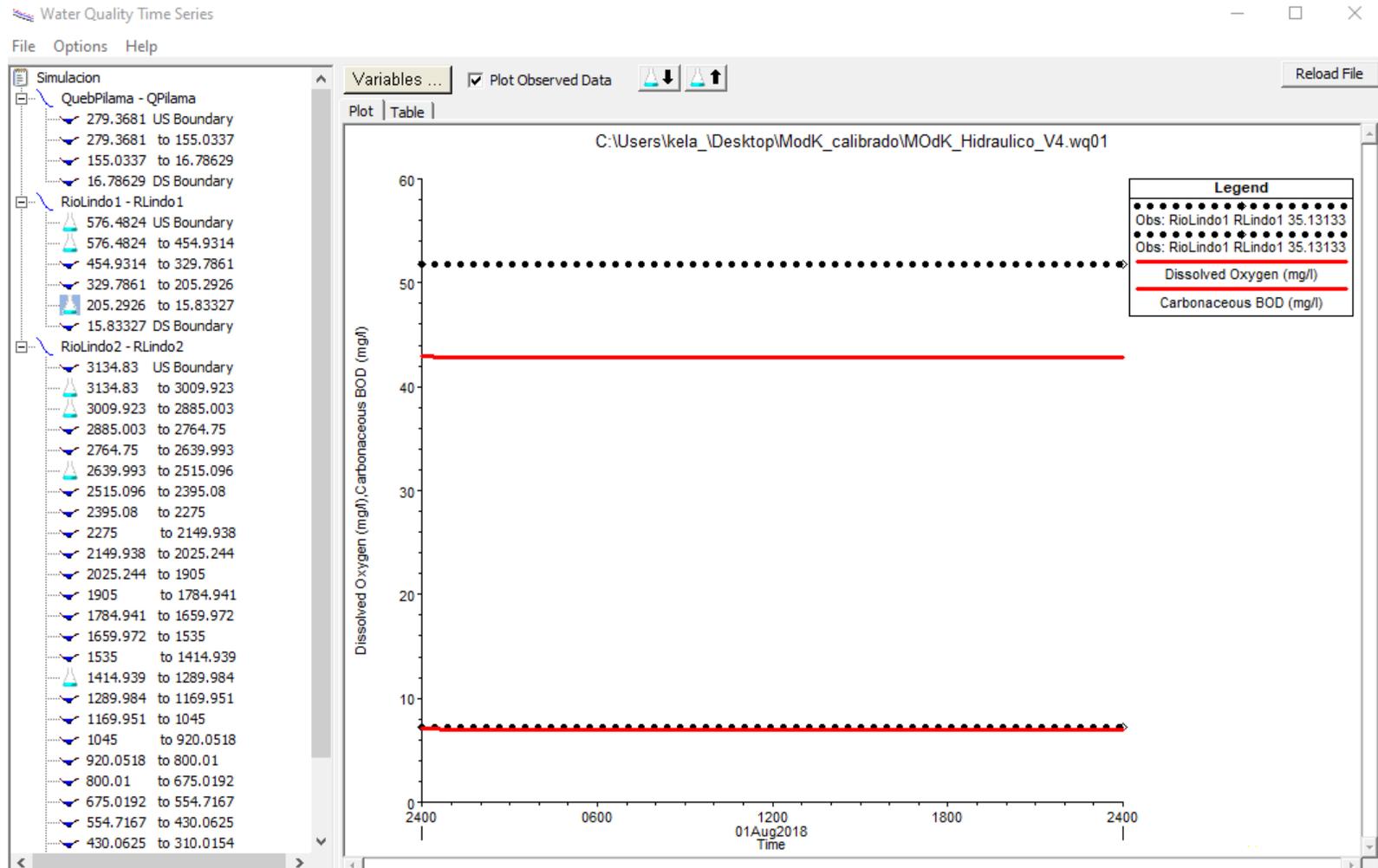


Figura 91. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 1, punto de muestreo 2 entre las secciones transversales K0+165 al K0+015.83 Fuente: HEC-RAS 5.0.6

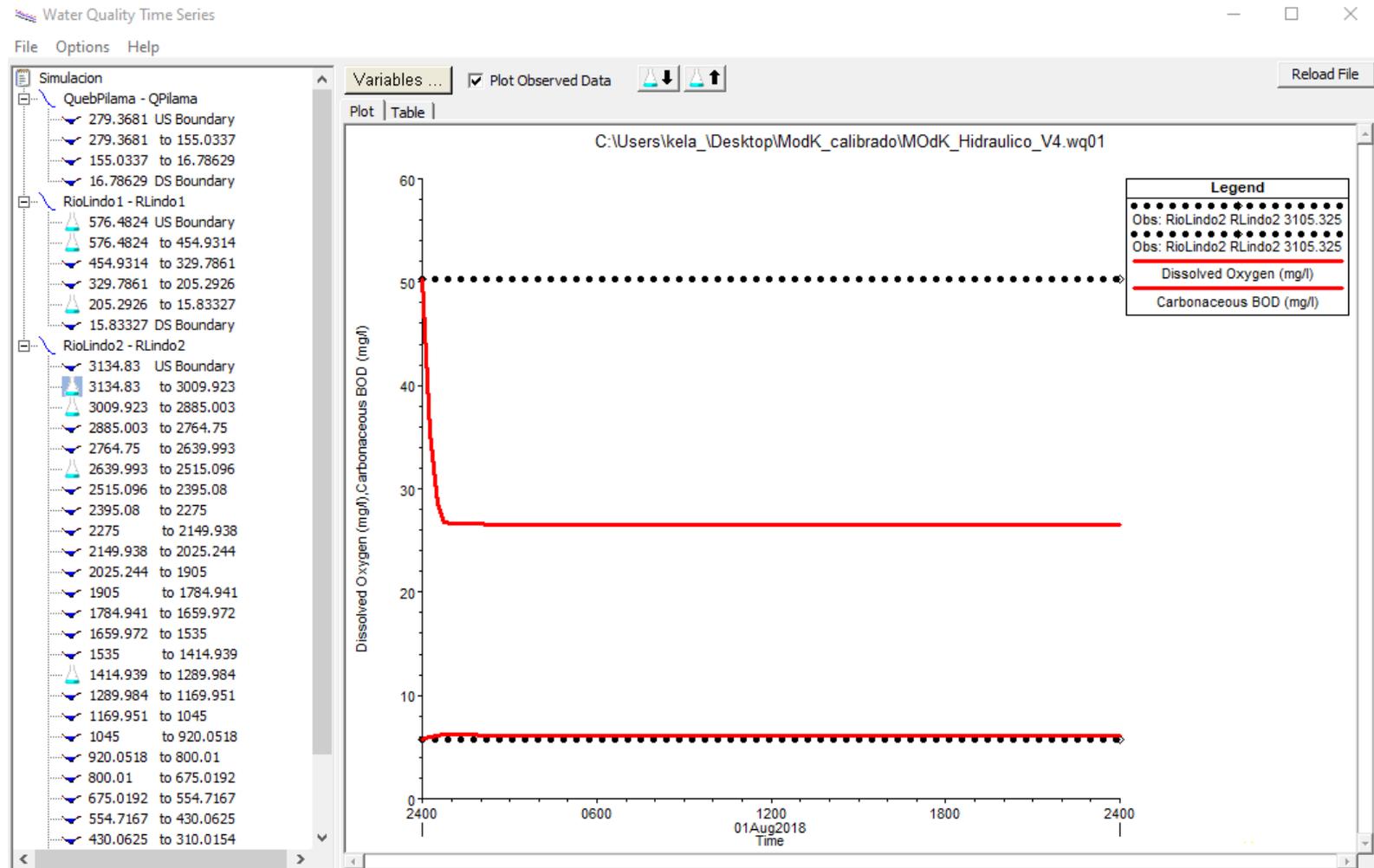


Figura 92. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 2, punto de muestreo 3 entre las secciones transversales K3+134.83 al K3+030 Fuente: HEC-RAS 5.0.6

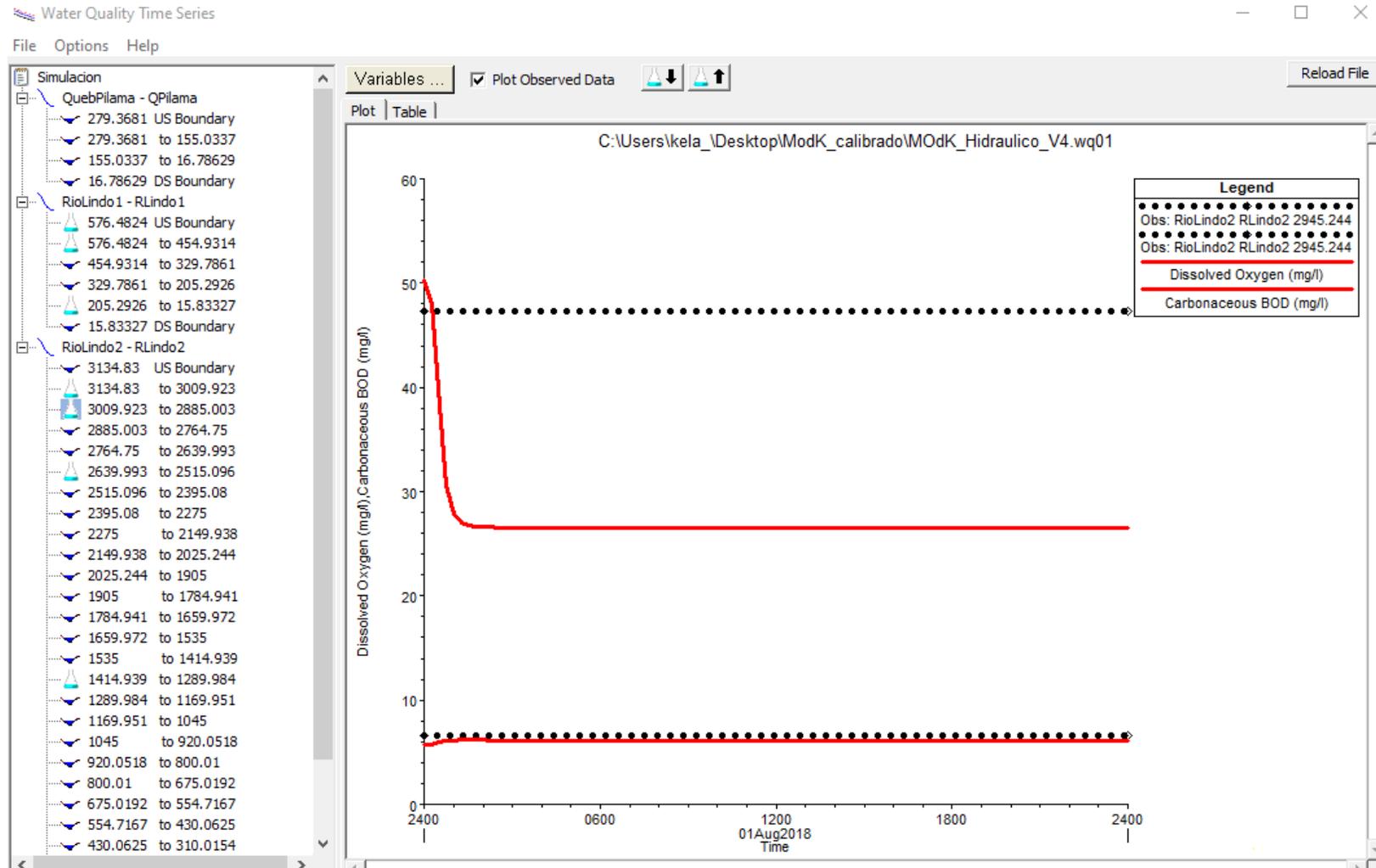


Figura 93. Calibración del OD y DBOC en el Río Lindo 2, punto de muestreo 4 entre las secciones transversales K3+030 al K2+925.07 Fuente: HEC-RAS 5.0.6

Tabla 82. Tabla de resultados de la calibración de calidad

Corriente		RS	Longitud celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)
QPilama	279.3681	US Frontera	0	5.63	16.96
QPilama	279.3681	155.0337	124.33	5.67728	16.94104
QPilama	155.0337	16.78629	138.2396	5.691515	16.94408
QPilama	16.78629	DS Frontera	0	5.731593	16.95263
RLindo1	576.4824	US Frontera	0	7.086	42.905
RLindo1	576.4824	454.9314	121.5792	7.044679	42.88453
RLindo1	454.9314	329.7861	125.1292	6.988597	42.85656
RLindo1	329.7861	205.2926	124.4693	6.94074	42.8145
RLindo1	205.2926	15.83327	189.4692	6.921435	42.79519
RLindo1	15.83327	DS Frontera	0	6.827895	42.70164
RLindo2	3134.83	US Frontera	0	6.141391	26.57761
RLindo2	3134.83	3009.923	124.9198	6.140244	26.57077
RLindo2	3009.923	2885.003	124.9	6.143396	26.55551
RLindo2	2885.003	2764.75	120.2604	6.16369	26.53489
RLindo2	2764.75	2639.993	124.7803	6.178125	26.51993
RLindo2	2639.993	2515.096	124.9198	6.183498	26.51153
RLindo2	2515.096	2395.08	120.0199	6.188513	26.50297
RLindo2	2395.08	2275	120.0796	6.192465	26.49421
RLindo2	2275	2149.938	125.0695	6.199114	26.48421
RLindo2	2149.938	2025.244	124.6903	6.201416	26.47404
RLindo2	2025.244	1905	120.2384	6.20662	26.4668
RLindo2	1905	1784.941	120.0592	6.213612	26.45882
RLindo2	1784.941	1659.972	124.939	6.237524	26.44373
RLindo2	1659.972	1535	124.99	6.256546	26.42666
RLindo2	1535	1414.939	120.0595	6.275122	26.41205
RLindo2	1414.939	1289.984	124.9299	6.289531	26.39835
RLindo2	1289.984	1169.951	120.0098	6.309958	26.3833
RLindo2	1169.951	1045	124.9494	6.329134	26.36803
RLindo2	1045	920.0518	124.9299	6.343343	26.35607
RLindo2	920.0518	800.01	120.0397	6.355656	26.347
RLindo2	800.01	675.0192	124.9698	6.368481	26.33625
RLindo2	675.0192	554.7167	120.3103	6.382582	26.32442
RLindo2	554.7167	430.0625	124.6501	6.394003	26.31056
RLindo2	430.0625	310.0154	120.0488	6.401948	26.29735
RLindo2	310.0154	184.9623	125.0503	6.411668	26.28561
RLindo2	184.9623	4.826761	180.1094	6.425062	26.26757
RLindo2	4.826761	DS Frontera	0	6.425062	26.26757

Fuente: elaboración propia

En las siguientes figuras se muestra el río Lindo y la Quebrada Pilama en planta mostrando el comportamiento del OD y DBOC en escala de 10 colores por el programa HEC-RAS.

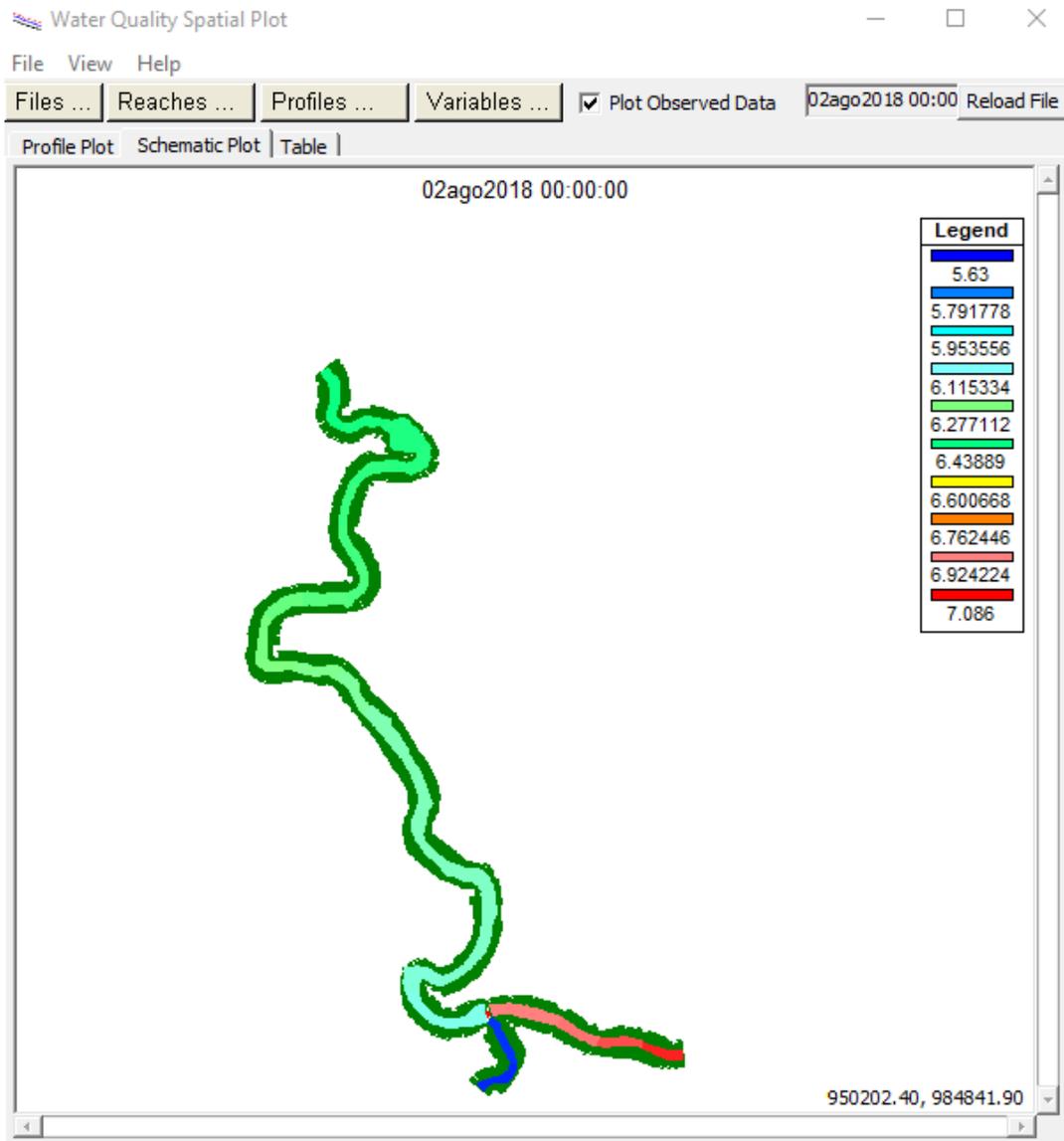


Figura 94. Calibración del OD del modelo de calidad del agua del Río Lindo en planta.

Fuente: HEC-RAS 5.0.6

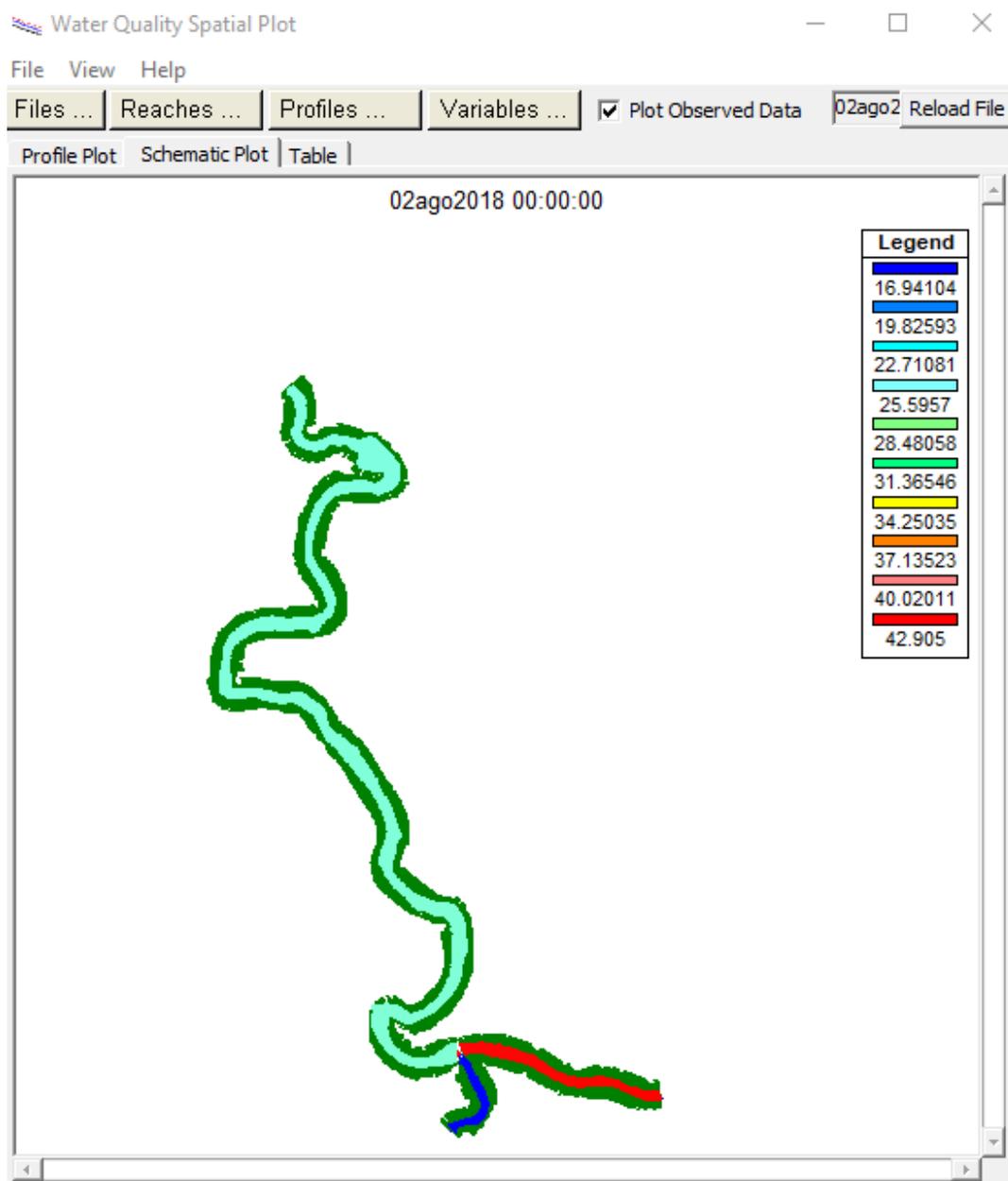


Figura 95. Calibración de la DBOC del modelo de calidad del agua del Río Lindo en planta.

Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11 CAPITULO Simulación de alternativas

11.1 Escenarios planteados

A continuación, se describe los diferentes escenarios aplicados al modelo de calidad del agua calibrado del río Lindo.

11.1.1. Escenario de simulación 1

En las modelaciones de calidad del agua se recomiendan condiciones críticas de caudal en este caso el índice hidrológico el $7Q_{10}$ con el fin de garantizar la dilución de los contaminantes. Los datos para el primer escenario a evaluar son caudal mínimo semanal para un periodo de retorno de 10 años, en cuanto a las concentraciones de DBOC y OD son condiciones actuales para el cauce principal y la corriente tributaria y las descargas de los vertimientos.

A continuación, se describe detalladamente los caudales mínimos semanales para un período de retorno de 10 años y las descargas que se ingresaron para este escenario 1 al programa HEC-RAS y seguido de su respectiva corrida.

Tabla 83. Caudales $7Q_{10}$

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m^3/s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.0015	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.00018	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 100	0.00016	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.00016	Afluente lateral izquierda

Fuente: elaboración propia

Tabla 84. Caudales del primer escenario al programa HEC-RAS

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m^3/s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.0015	Caudal aguas arriba

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m ³ /s)	Descripción
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 415.1173	0.0057326	Descarga 7
Río Lindo 1	K0 + 224.9999	0.0064493	Descarga 8
Río Lindo 2	K3 + 134.83	0.0079493	Confluencia
Río Lindo 2	K3 + 039.977	0.0092493	Descarga 10
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.0094293	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 605.012	0.0095208	Descarga 11
Río Lindo 2	K2 + 594.996	0.0102038	Descarga 12
Río Lindo 2	K2 + 100	0.0103638	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.0105238	Afluente lateral izquierda
Río Lindo 2	K1 + 350.292	0.01053	Zona PTAR

Fuente: elaboración propia

Steady Flow Data - Caudal

Description : Apply Data

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates	
River	Reach	RS	PF 1	
1	QuebPilama	QPilama	279.3681	0.0015
2	RioLindo1	RLindo1	576.4824	0.0057
3	RioLindo1	RLindo1	415.1173	0.0057326
4	RioLindo1	RLindo1	224.9999	0.0064493
5	RioLindo2	RLindo2	3134.83	0.0079493
6	RioLindo2	RLindo2	3039.977	0.0092493
7	RioLindo2	RLindo2	2846.074	0.0094293
8	RioLindo2	RLindo2	2605.012	0.0095208
9	RioLindo2	RLindo2	2594.996	0.0102038
10	RioLindo2	RLindo2	2100	0.0103638
11	RioLindo2	RLindo2	1480.23	0.0105238
12	RioLindo2	RLindo2	1350.292	0.01053

Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)

Figura 96. Caudales del primer escenario. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11.1.1.1 Resultados del escenario 1

En la figura 97 y figura 98 se presentan las curvas del oxígeno disuelto y DBO última carbonácea a lo largo de la corriente del río Lindo 1 y río Lindo 2 para caudales mínimos.

Puede observarse que, en el escenario analizado, las concentraciones de OD en el río Lindo 2 varía entre 4.86 mg/l a 6.25 mg/l presentando condiciones buenas. Por otra parte, la DBOC muestra incremento aguas abajo, alcanzando un valor de 48.84 mg/l.

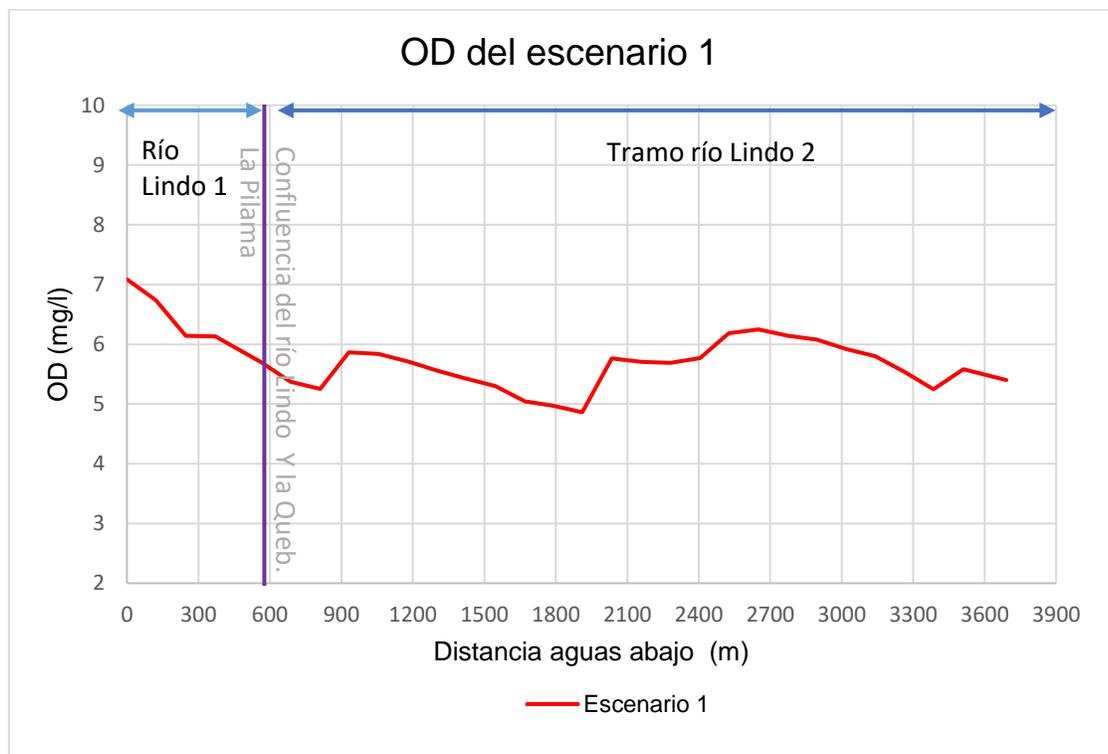


Figura 97. Oxígeno disuelto del escenario 1. Fuente: Elaboración propia

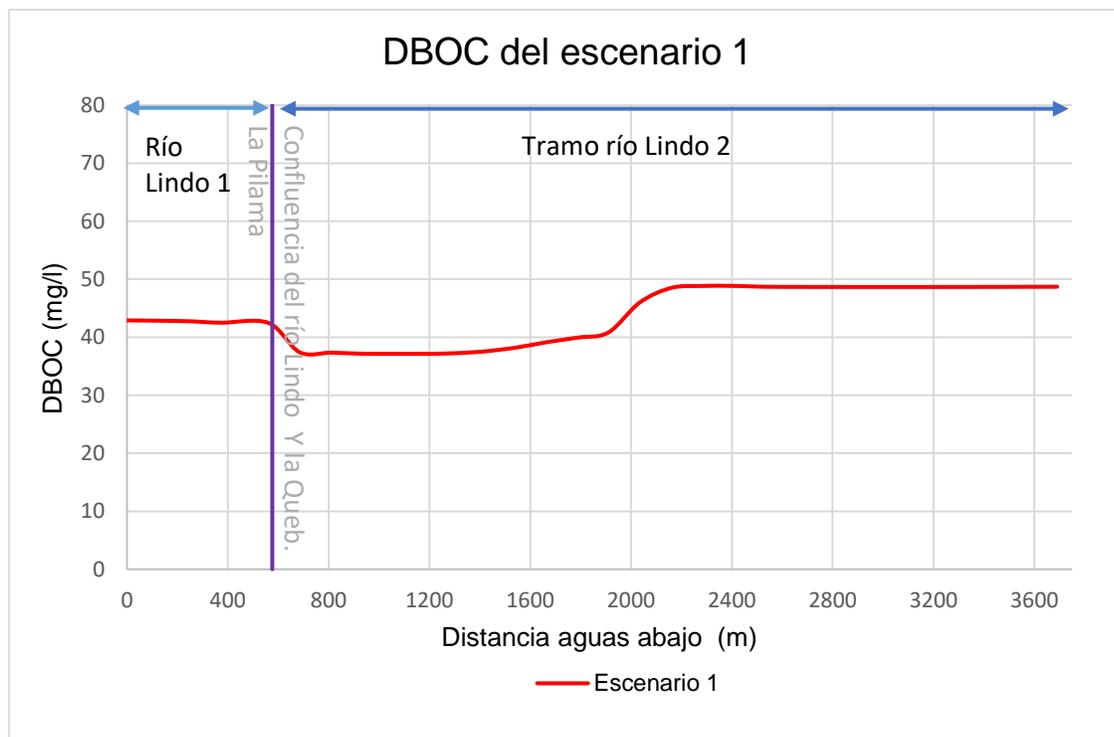


Figura 98. DBOC del escenario 1. Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla 85 se muestra los resultados obtenidos por el programa HEC-RAS para el OD y DBOC describiendo su respectiva corriente y la longitud de la celda.

Tabla 85. Resultados obtenidos del primer escenario

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)
QPilama	279.3681	US Frontera	0	16.96
QPilama	279.3681	155.0337	6.094385	16.58474
QPilama	155.0337	16.78629	6.02074	16.53967
QPilama	16.78629	DS Frontera	0	16.54035
RLindo1	576.4824	US Frontera	0	42.905
RLindo1	576.4824	454.9314	6.7357	42.84886
RLindo1	454.9314	329.7861	6.142155	42.75414
RLindo1	329.7861	205.2926	6.129348	42.49907
RLindo1	205.2926	15.83327	5.702626	42.47931
RLindo1	15.83327	DS Frontera	0	42.31041
RLindo2	3134.83	US Frontera	0	37.4477
RLindo2	3134.83	3009.923	5.376063	37.40063
RLindo2	3009.923	2885.003	5.251353	37.34978

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)	
RLindo2	2885.003	2764.75	120.2604	5.86552	37.16243
RLindo2	2764.75	2639.993	124.7803	5.836755	37.14065
RLindo2	2639.993	2515.096	124.9198	5.712399	37.14137
RLindo2	2515.096	2395.08	120.0199	5.56258	37.24411
RLindo2	2395.08	2275	120.0796	5.429772	37.56915
RLindo2	2275	2149.938	125.0695	5.301084	38.2261
RLindo2	2149.938	2025.244	124.6903	5.044729	39.18009
RLindo2	2025.244	1905	120.2384	4.972094	39.94825
RLindo2	1905	1784.941	120.0592	4.861705	40.82951
RLindo2	1784.941	1659.972	124.939	5.763493	46.02052
RLindo2	1659.972	1535	124.99	5.703814	48.5186
RLindo2	1535	1414.939	120.0595	5.687056	48.83593
RLindo2	1414.939	1289.984	124.9299	5.768211	48.84951
RLindo2	1289.984	1169.951	120.0098	6.182296	48.70911
RLindo2	1169.951	1045	124.9494	6.248326	48.67793
RLindo2	1045	920.0518	124.9299	6.143562	48.66561
RLindo2	920.0518	800.01	120.0397	6.075497	48.66295
RLindo2	800.01	675.0192	124.9698	5.919657	48.66246
RLindo2	675.0192	554.7167	120.3103	5.801133	48.66302
RLindo2	554.7167	430.0625	124.6501	5.536661	48.66583
RLindo2	430.0625	310.0154	120.0488	5.248681	48.67178
RLindo2	310.0154	184.9623	125.0503	5.580007	48.68525
RLindo2	184.9623	4.826761	180.1094	5.403794	48.70406
RLindo2	4.826761	DS Frontera	0	5.403125	48.70747

Fuente: elaboración propia

En la figura 99 y figura 100 se muestra el comportamiento del OD y DBOC obtenidos para el primer escenario por el programa HEC-RAS es una escala de 10 colores determinados por el programa; indicando el color rojo el valor más alto 7.086 mg/l y el color azul el más bajo de 4.86 mg/l para el OD y para la DBOC el color rojo un valor de 48.85 mg/l y color azul de 16.54 mg/l.

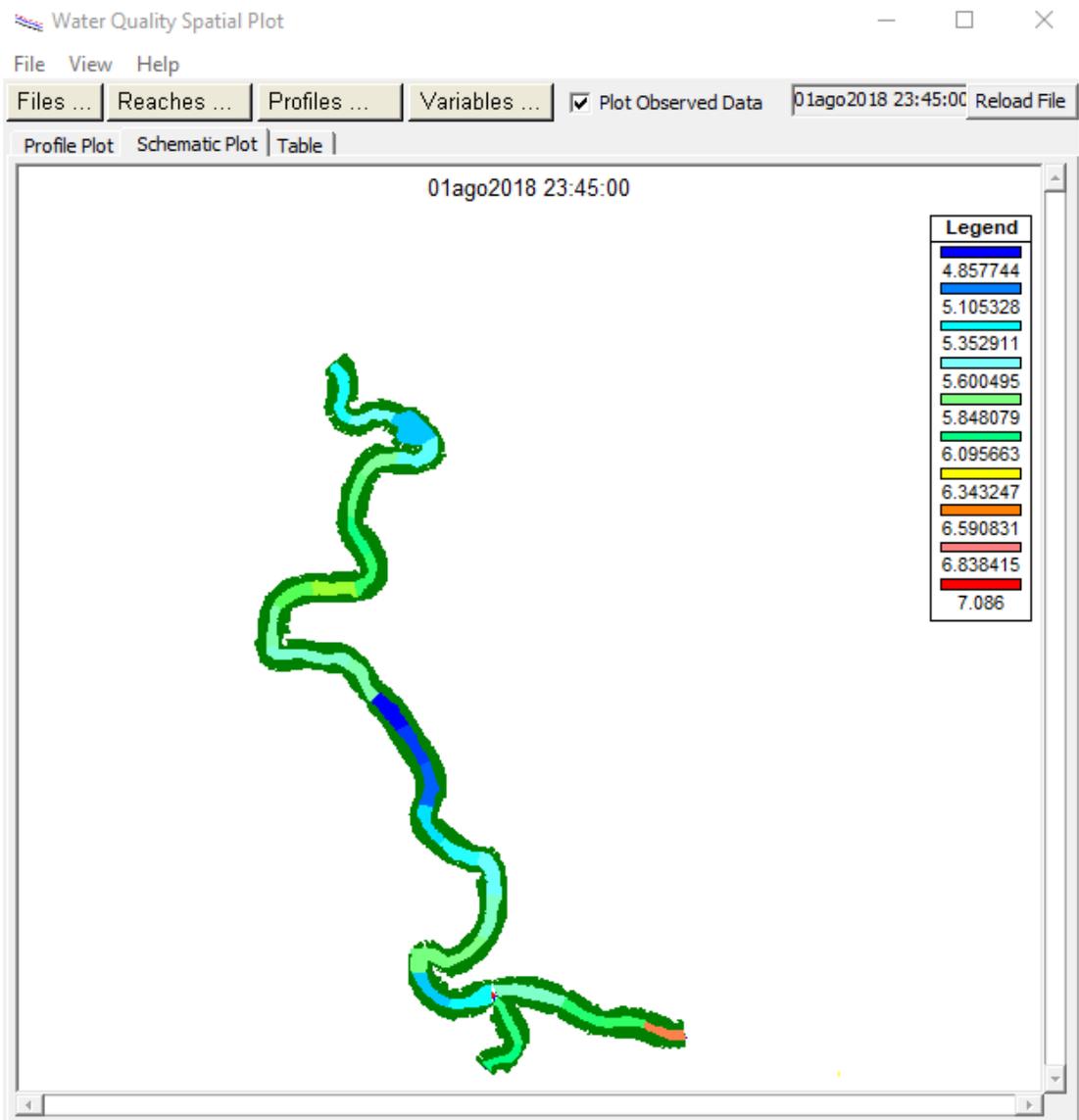


Figura 99. Comportamiento del OD del escenario 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

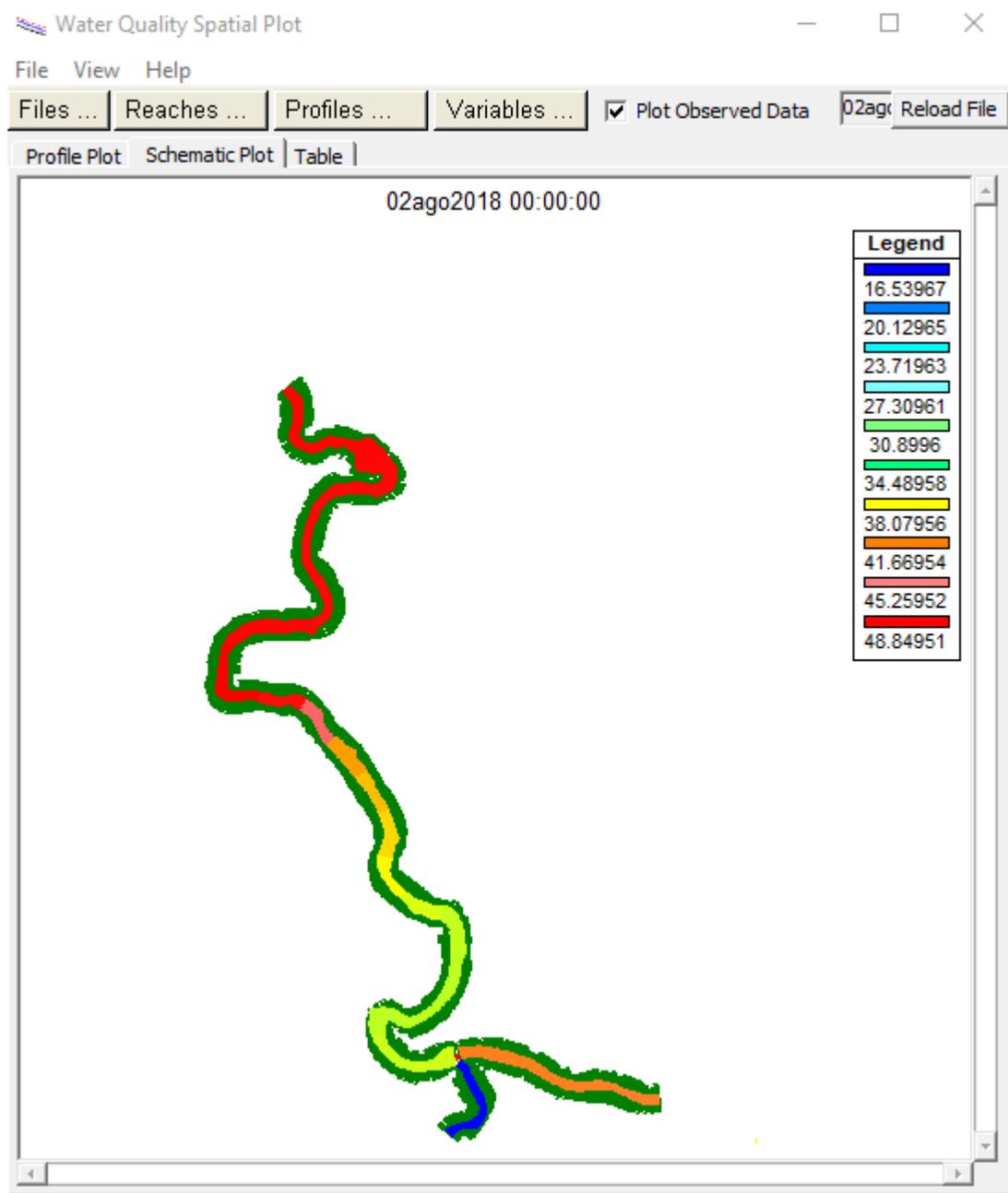


Figura 100. Comportamiento de la DBOC del escenario 1. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11.1.2. Escenario de simulación 2

El segundo escenario de calidad, se modela el caudal mínimo semanal ($7Q_{10}$) y las descargas de aguas residuales teniendo en cuenta el aumento de la población para una proyección a 25 años (Decreto 0330, Art. 40, MVCT 2017) y se realiza mediante un factor de crecimiento.

Tabla 86. Población proyectada y tasas de crecimiento quinquenales

	Año	Población
	2018	4286
Proyección	2020	4617
	2025	4914
	2030	5231
	2035	5573
	2040	5942
	2045	6344

Fuente: elaboración propia

De lo anterior:

$$6344 = 4286 (1 - i)^{27}$$

Para el periodo 2020-2045 se tendrá una tasa anual de 1.463% de crecimiento, por lo tanto, los caudales ajustados para las respectivas descargas son:

Tabla 87. Datos de entrada y caudales ajustados para la simulación 2

Descarga	Tramo	Sección	OD (mg/L)	DBOC (mg/L)	Caudal 2018 (m ³ /s)	Caudal 2045 (m ³ /s)
		Transversal HEC-RAS				
D.7	Río Lindo 1	K0 + 415.1173	2.136	230.60	0.0000326	0.0000483
D.8	Río Lindo 1	K0 + 224.9999	6.019	20.35	0.0007167	0.0010608
D.10	Río Lindo 2	K3 + 039.977	0.097	135.65	0.0013017	0.0019267
D.11	Río Lindo 2	K2 + 605.012	1.068	33.91	0.0000915	0.0001354
D.12	Río Lindo 2	K2 + 594.996	0.970	108.52	0.0006831	0.0010111

Fuente: elaboración propia

A continuación, se describe detalladamente los caudales mínimos semanales para un período de retorno de 10 años y las descargas que se ingresaron para este escenario 2 al programa HEC-RAS y seguidamente de su respectiva corrida.

Tabla 88. Caudales del segundo escenario al programa HEC-RAS

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m ³ /s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.0015	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 415.1173	0.0057483	Descarga 7
Río Lindo 1	K0 + 224.9999	0.0068091	Descarga 8
Río Lindo 2	K3 + 134.83	0.0083091	Confluencia
Río Lindo 2	K3 + 039.977	0.0102358	Descarga 10
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.0104158	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 605.012	0.0105512	Descarga 11
Río Lindo 2	K2 + 594.996	0.0115623	Descarga 12
Río Lindo 2	K2 + 100	0.0117223	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.0118823	Afluente lateral izquierda
Río Lindo 2	K1 + 350.292	0.0119	Zona PTAR

Fuente: elaboración propia

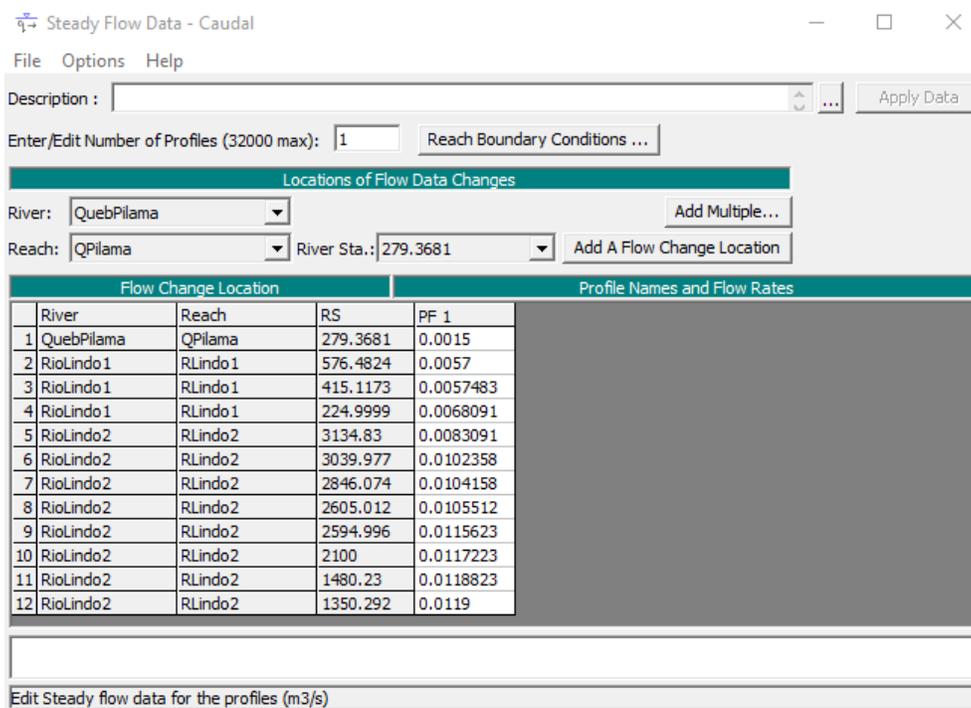


Figura 101. Caudales ingresados para el segundo escenario. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11.1.2.1 Resultados del escenario 2

En la figura 102 y figura 103 se incluyen los resultados de la simulación del escenario 2, para OD y DBOC.

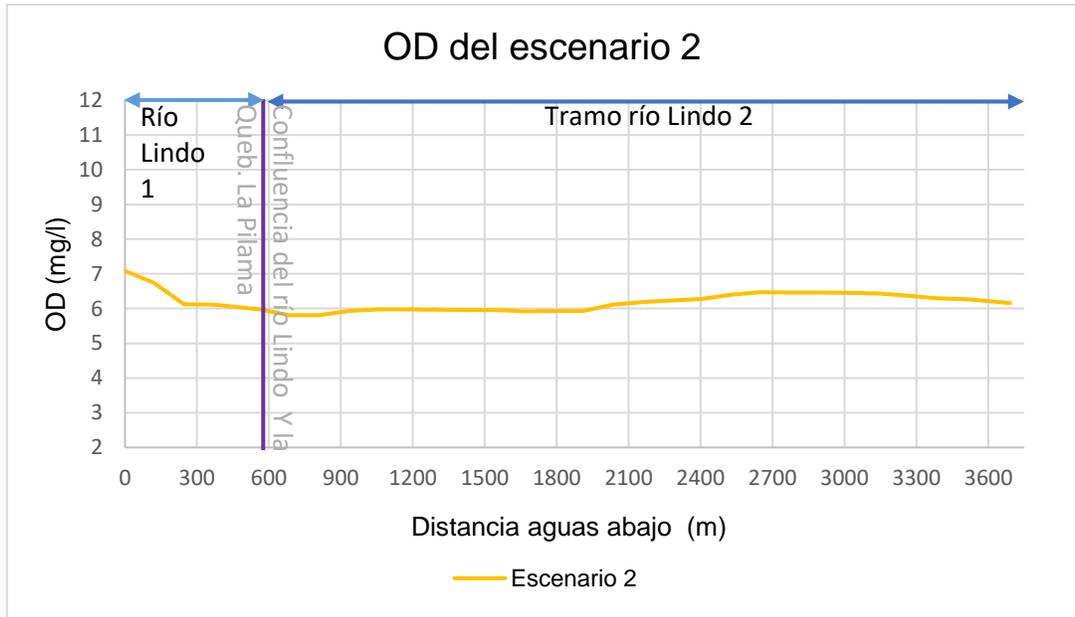


Figura 102. OD del escenario 2. Fuente: Elaboración propia

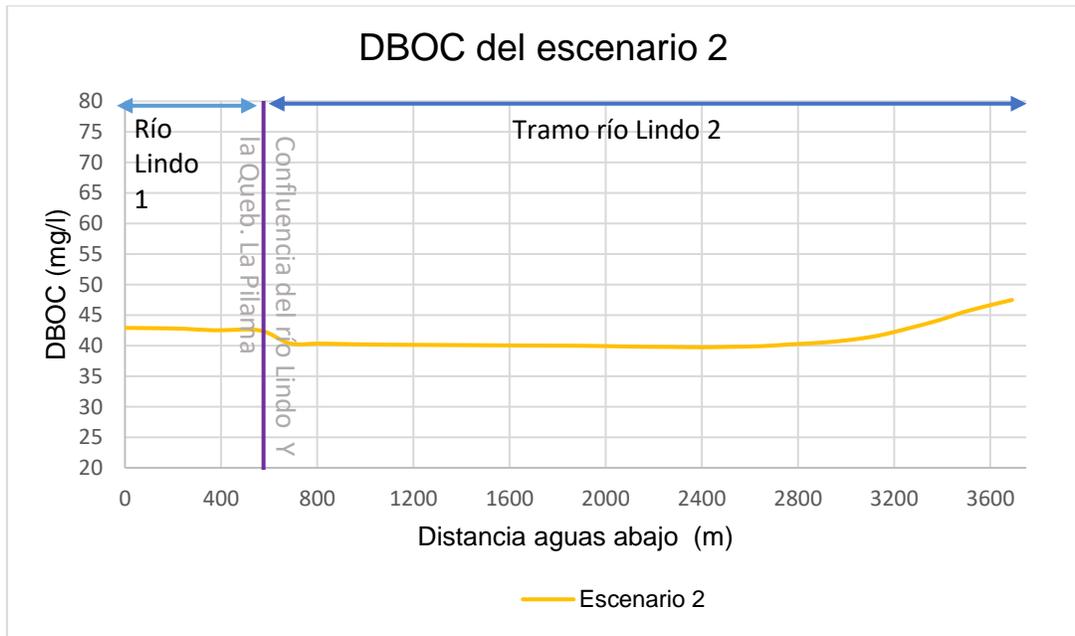


Figura 103. DBOC del escenario 2. Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 102, el oxígeno disuelto en el río Lindo, en condiciones de caudales mínimos y los vertimientos de aguas negras directamente al río sin ningún tratamiento, se puede observar en el tramo de estudio río Lindo 2 varía entre 5.81 mg/l a 6.47 mg/l.

En la figura 103, se presenta el comportamiento de la DBO última carbonácea en el río Lindo 1 se mantiene entre 42.39 mg/l a 42.90 mg/l y en el tramo del río Lindo 2 se evidencia un incremento entre 39.73 mg/l a 47.62 mg/l, debido a las descargas 10 y 12 que son las que tienen mayor concentración de DBOC.

A continuación, en la tabla 89 se muestra los resultados obtenidos del programa HEC-RAS para el segundo escenario planteado indicando la corriente, las secciones transversales, longitud de celda, el OD Y DBOC.

Tabla 89. Resultados obtenidos del segundo escenario

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)	
QPilama	279.3681	US Frontera	0	5.63	16.96
QPilama	279.3681	155.0337	124.33	6.105118	16.58247
QPilama	155.0337	16.78629	138.2396	6.038963	16.54616
QPilama	16.78629	DS Frontera	0	5.948787	16.54838
RLindo1	576.4824	US Frontera	0	7.086	42.905
RLindo1	576.4824	454.9314	121.5792	6.739209	42.8482
RLindo1	454.9314	329.7861	125.1292	6.121646	42.75644
RLindo1	329.7861	205.2926	124.4693	6.116961	42.50778
RLindo1	205.2926	15.83327	189.4692	5.980429	42.4891
RLindo1	15.83327	DS Frontera	0	5.910118	42.39153
RLindo2	3134.83	US Frontera	0	5.913103	40.39644
RLindo2	3134.83	3009.923	124.9198	5.81136	40.36841
RLindo2	3009.923	2885.003	124.9	5.811929	40.33188
RLindo2	2885.003	2764.75	120.2604	5.931425	40.24752
RLindo2	2764.75	2639.993	124.7803	5.979969	40.16495
RLindo2	2639.993	2515.096	124.9198	5.973782	40.13438
RLindo2	2515.096	2395.08	120.0199	5.967864	40.10718
RLindo2	2395.08	2275	120.0796	5.959311	40.08114
RLindo2	2275	2149.938	125.0695	5.953782	40.04935
RLindo2	2149.938	2025.244	124.6903	5.924329	40.01999
RLindo2	2025.244	1905	120.2384	5.927091	39.99811
RLindo2	1905	1784.941	120.0592	5.930654	39.97363
RLindo2	1784.941	1659.972	124.939	6.115649	39.89206
RLindo2	1659.972	1535	124.99	6.18913	39.8157
RLindo2	1535	1414.939	120.0595	6.232703	39.77704

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)
RLindo2	1414.939	1289.984	124.9299	39.72682
RLindo2	1289.984	1169.951	120.0098	39.80915
RLindo2	1169.951	1045	124.9494	39.91469
RLindo2	1045	920.0518	124.9299	40.22545
RLindo2	920.0518	800.01	120.0397	40.48412
RLindo2	800.01	675.0192	124.9698	40.95337
RLindo2	675.0192	554.7167	120.3103	41.6858
RLindo2	554.7167	430.0625	124.6501	42.88356
RLindo2	430.0625	310.0154	120.0488	44.14976
RLindo2	310.0154	184.9623	125.0503	45.72766
RLindo2	184.9623	4.826761	180.1094	47.48024
RLindo2	4.826761	DS Frontera	0	47.6247

Fuente: elaboración propia

En la figura 104 y figura 105 se muestra el resultado del comportamiento del OD y DBOC del segundo escenario planteado en una escala de 10 colores determinadas por el programa mostrando para el OD el color azul un valor de 5.63 mg/l, el amarillo un valor de 6.60 mg/l y el color rojo un valor de 7.086 mg/l. Para la DBOC el color azul un valor de 16.55 mg/l, el amarillo de 37.17 mg/l y el rojo de 47.48 mg/l.

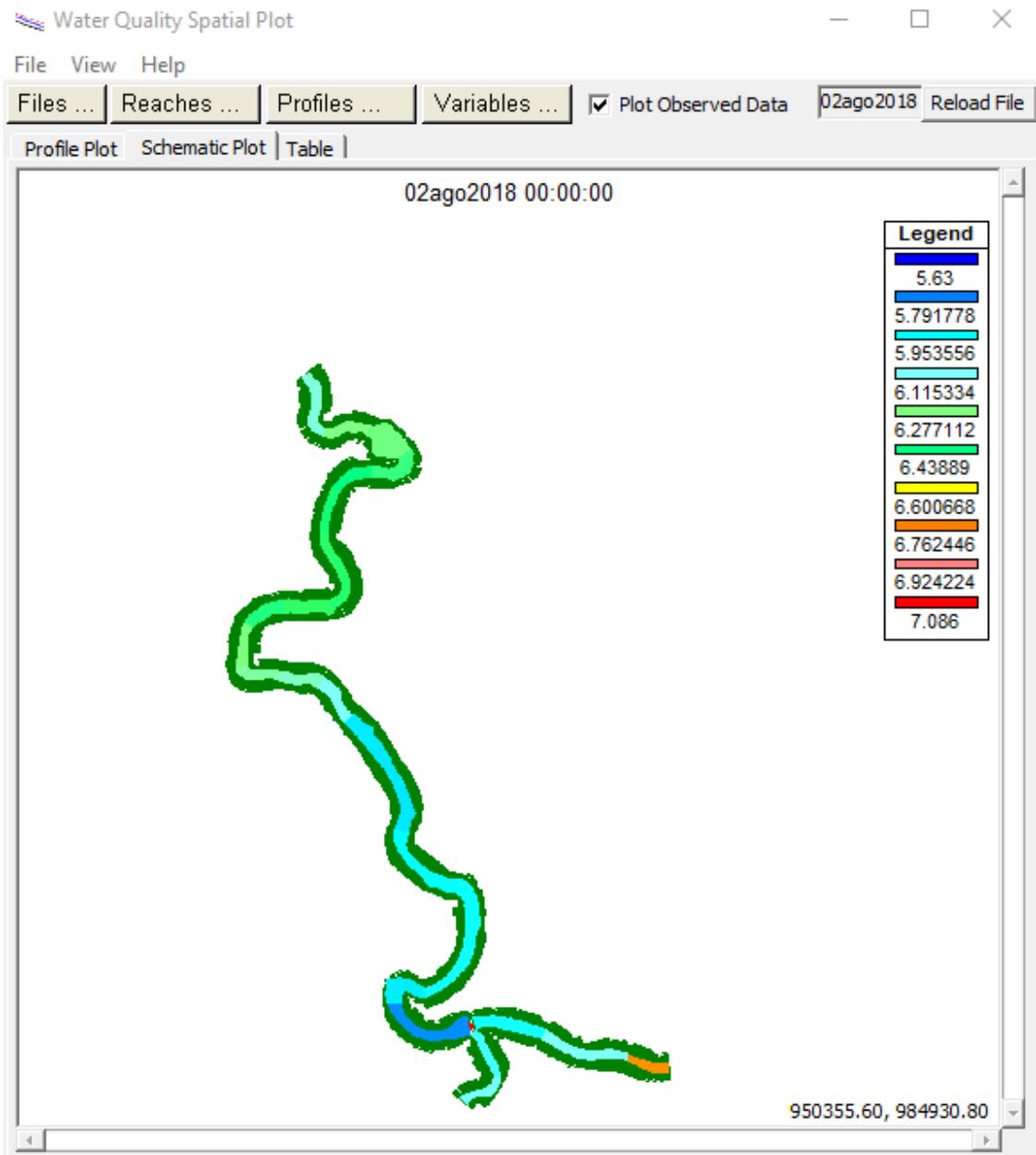


Figura 104. Comportamiento del OD del escenario 2. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

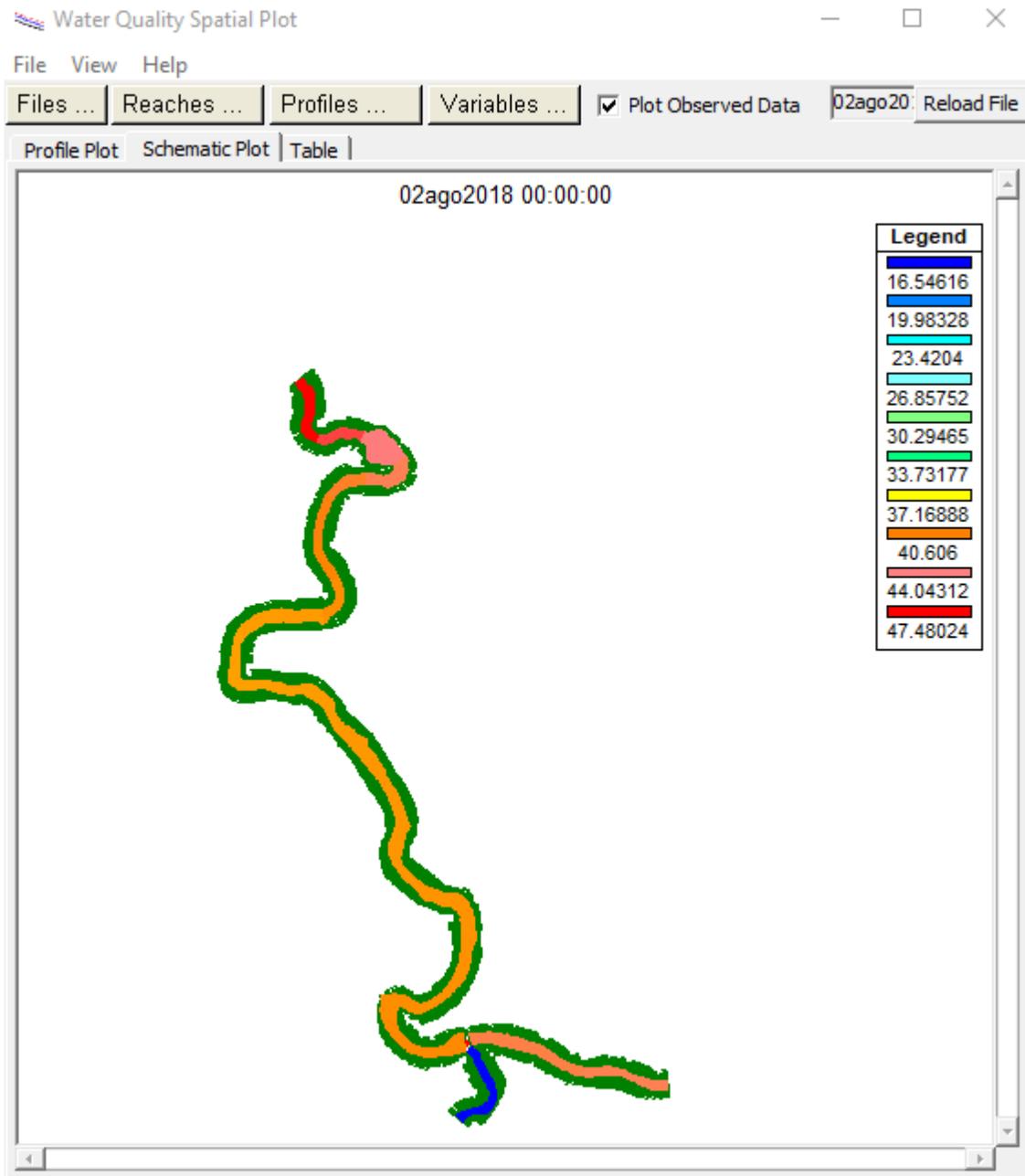


Figura 105. Comportamiento de la DBOC del escenario 2. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11.1.3. Escenario de simulación 3

El escenario tres se desarrolla la simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), caudales mínimos semanales ($7Q_{10}$) e interceptando los vertimientos de aguas residuales.

Se modelará el caudal de demanda para una proyección de la población del municipio de Viotá para 25 años, este municipio está ubicada a 567 m.s.n.m., para establecer el caudal futuro de vertimiento para el total de la población se realizó los lineamientos interpuestos por la norma RAS 2017³¹.

El factor de dotación máxima demanda poblacional será de 140 L/d/Hab (Art. 43, RAS 2017) y teniendo en cuenta el Art. 134:

$$Q_D = \frac{C_R \cdot P \cdot D_{Neta}}{86400}$$

Donde:

D_{Neta} = dotación neta

P = población al horizonte de diseño

C_R = coeficiente de retorno igual a 0.85

Con la anterior ecuación se obtiene el caudal medio:

$$Q_D = \frac{0.85 \cdot 6344 \cdot 140}{86400} = 8.74L/s$$

Para calcular el factor de mayoración se puede emplear los siguientes métodos Harmon, Babbit y Flores.

³¹ Resolución 330 del 2017-RAS, (2017). Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Colombia

Tabla 90. Valores calculados para el factor de mayoración

Factor	Ecuación	F
Harmon	$F = 1 + (14 / ((4 + P^{0.5})))$	1.17
Babbit	$F = 5 / P^{0.2}$	0.87
Flores	$F = 3.5 / P^{0.1}$	1.46

Fuente: elaboración propia

La resolución 330 de 2017 (RAS) establece que en general el valor del factor de mayoración debe ser mayor o igual a 1.4 y para este estudio se tomó el valor del método de flores.

Por lo tanto, el caudal máximo horario es:

$$Q_{HM} = 1.46 \times 8.738 = 12.74 \text{ L/s}$$

En la tabla 91 se muestran los valores empleados y obtenidos para calcular el caudal de diseño como, caudal de conexiones erradas, caudal de infiltración, área municipal de Viotá y el caudal máximo horario.

Tabla 91. Valores empleados para el cálculo del caudal de diseño

Q Erradas	0.2	L/s. Ha
Q de Infiltración	0.1	L/s. Ha
Área	69.9	Ha

Fuente: elaboración propia

Con la información anterior se tendrá un caudal total de aguas residuales de:

$$Q_R = 12.74 + 20.97 = 33.71 \text{ L/s}$$

De acuerdo con la normatividad vigente, la resolución 0631 de 2015 de MinAmbiente en su artículo 8 determina que el valor máximo permisible de vertimiento para sistemas de alcantarillado entregado a un cuerpo de agua superficiales es DBO_5 de 90 ml/L y una DQO de 180 mg/L.

A continuación, se describe detalladamente los caudales mínimos semanales ingresados al programa HEC-RAS y seguido de su respectiva corrida.

Tabla 92. Caudales del tercer escenario al programa HEC-RAS

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal (m ³ /s)	Descripción
Queb. Pilama	K0 + 279.3681	0.0015	Caudal aguas arriba
Río Lindo 1	K0 + 576.4824	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo 2	K3 + 134.83	0.0072	Confluencia
Río Lindo 2	K2 + 846.074	0.00738	Quebrada Sirena
Río Lindo 2	K2 + 100	0.00754	Afluente lateral derecha
Río Lindo 2	K1 + 480.23	0.0077	Afluente lateral izquierda
Río Lindo 2	K1 + 350.292	0.04141	Zona PTAR

Fuente: elaboración propia

11.1.3.1 Resultados del escenario 3

En la figura 106 y figura 107, se muestran los resultados obtenidos para el escenario 3 de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Se observa que el comportamiento del OD desde la piscina municipal hasta la confluencia de la quebrada La Pilama con el río Lindo concentraciones entre 7.09 mg/l a 5.47 mg/l y para la DBO última carbonácea valores de 42.90 mg/l a 42.29 mg/l.

El oxígeno disuelto después de la PTAR (cumpliendo con la norma de vertimiento) alcanza concentraciones entre 12.22 mg/l a 15.55 mg/l y para la demanda bioquímica de oxígeno última carbonácea con valores 212.92 mg/l a 266.43 mg/l no cumple con la norma del río Clase I (acuerdo 043/2006-CAR) porque se encuentra por encima del parámetro.

La sección transversal el K0+4.86 (3690.57 metros aguas abajo desde el punto de control) del tramo río Lindo 2 se tiene los valores de OD de 15.59 mg/l y DBOC de 266.53 mg/l, esta última sección transversal del estudio a 100 metros se encuentra el río Calandaima lo cual el río Lindo es un afluente de este, se advierte que agua abajo de esta corriente continua el crecimiento de la DBOC afectando a la entrega al río Calandaima con altas concentraciones.

Se evidencia con esta simulación que el municipio de Viotá necesita realizar un estudio más detallado del diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para el río Lindo, no es conveniente una planta convencional por los resultados obtenidos aguas abajo, más bien se requiere con tratamientos secundarios y con remoción del 80% de DBO, con el fin de evitar la contaminación de su recurso hídrico, y así, de esta forma es la única manera que el río tenga la capacidad de manejar las cargas que entrega el municipio, ayudar con el proceso de oxigenación y también mejorar la dilución de entrega al río Calandaima.

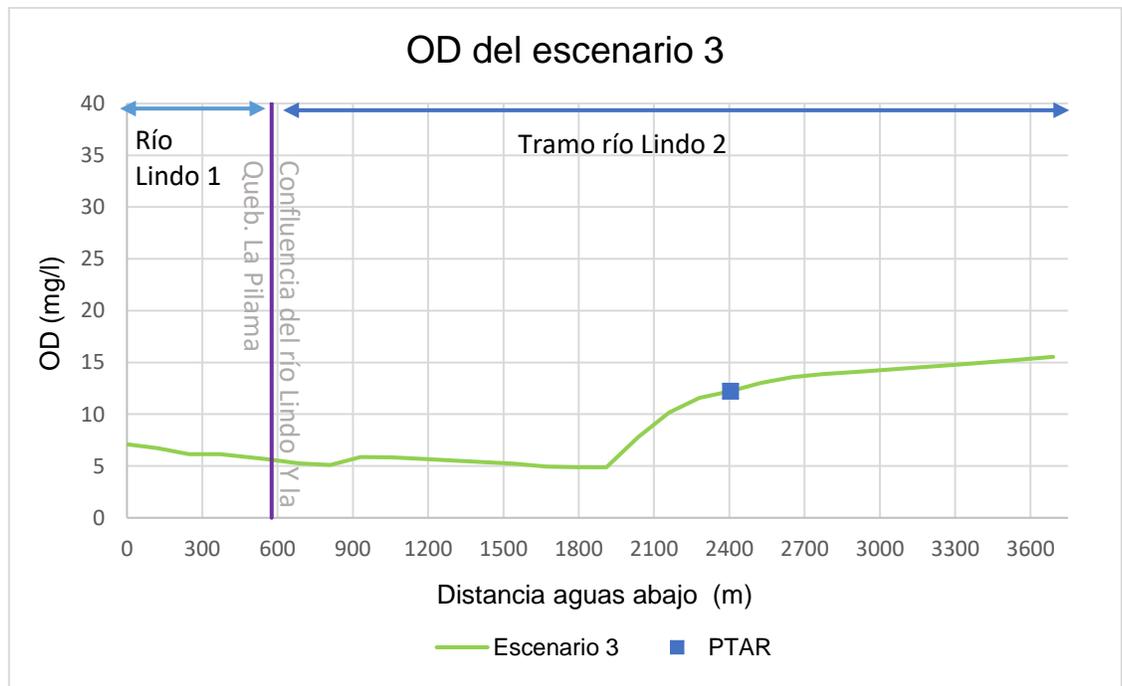


Figura 106. OD del escenario 3. Fuente: Elaboración propia

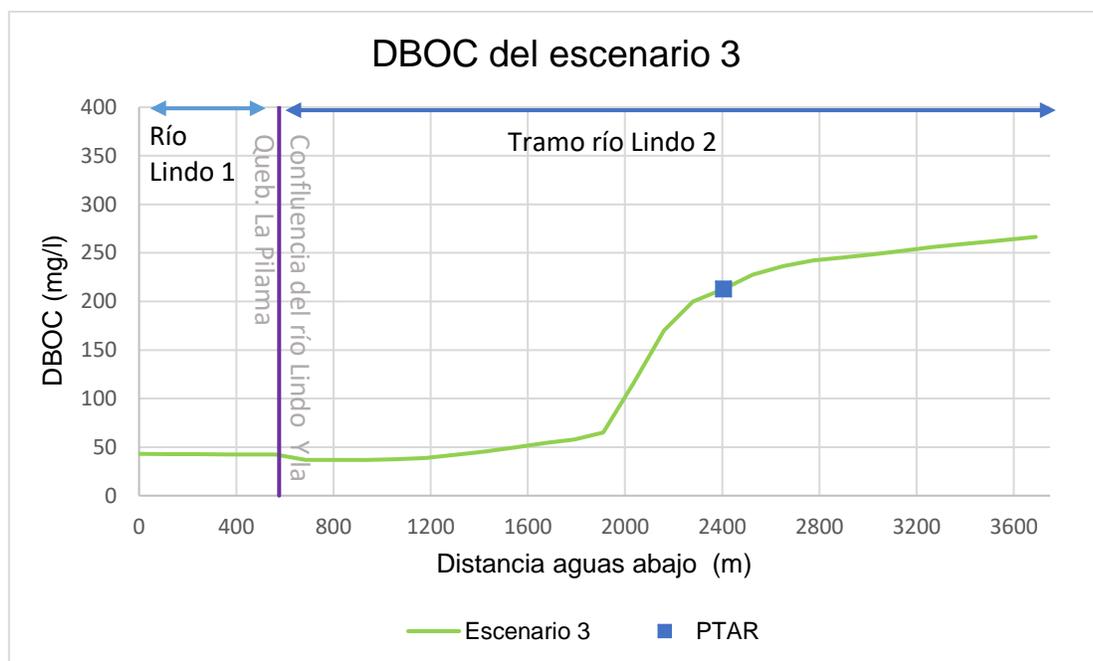


Figura 107. DBOC del escenario 3. Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta los datos obtenidos del programa HEC-RAS para la tercera simulación.

Tabla 93. Resultados del tercer escenario

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)	
QPilama	279.3681	US Frontera	0	5.63	16.96
QPilama	279.3681	155.0337	124.33	6.097001	16.58698
QPilama	155.0337	16.78629	138.2396	6.033032	16.54885
QPilama	16.78629	DS Frontera	0	5.633952	16.54938
RLindo1	576.4824	US Frontera	0	7.086	42.905
RLindo1	576.4824	454.9314	121.5792	6.735332	42.84892
RLindo1	454.9314	329.7861	125.1292	6.144745	42.75403
RLindo1	329.7861	205.2926	124.4693	6.130476	42.49876
RLindo1	205.2926	15.83327	189.4692	5.640821	42.47821
RLindo1	15.83327	DS Frontera	0	5.468995	42.29205
RLindo2	3134.83	US Frontera	0	5.503361	36.92899
RLindo2	3134.83	3009.923	124.9198	5.268671	36.88545
RLindo2	3009.923	2885.003	124.9	5.106925	36.82456
RLindo2	2885.003	2764.75	120.2604	5.874217	36.74974
RLindo2	2764.75	2639.993	124.7803	5.828564	37.4335
RLindo2	2639.993	2515.096	124.9198	5.679976	38.80906

Corriente	RS	Longitud de celda (m)	OD (mg/l)	DBOC (mg/l)	
RLindo2	2515.096	2395.08	120.0199	5.519156	42.1106
RLindo2	2395.08	2275	120.0796	5.384867	45.428
RLindo2	2275	2149.938	125.0695	5.237971	49.76752
RLindo2	2149.938	2025.244	124.6903	4.933673	54.23121
RLindo2	2025.244	1905	120.2384	4.892202	57.9202
RLindo2	1905	1784.941	120.0592	4.880081	65.07119
RLindo2	1784.941	1659.972	124.939	7.763048	115.6455
RLindo2	1659.972	1535	124.99	10.15777	170.1415
RLindo2	1535	1414.939	120.0595	11.57181	200.0442
RLindo2	1414.939	1289.984	124.9299	12.22352	212.9254
RLindo2	1289.984	1169.951	120.0098	13.0398	227.5869
RLindo2	1169.951	1045	124.9494	13.56369	236.4573
RLindo2	1045	920.0518	124.9299	13.88995	242.2892
RLindo2	920.0518	800.01	120.0397	14.06694	245.2128
RLindo2	800.01	675.0192	124.9698	14.27227	248.6466
RLindo2	675.0192	554.7167	120.3103	14.49518	252.1122
RLindo2	554.7167	430.0625	124.6501	14.72926	255.9421
RLindo2	430.0625	310.0154	120.0488	14.92295	258.9931
RLindo2	310.0154	184.9623	125.0503	15.1735	262.0259
RLindo2	184.9623	4.826761	180.1094	15.54573	266.4294
RLindo2	4.826761	DS Frontera	0	15.58725	266.5323

Fuente: elaboración propia

En la figura 108 y figura 109 se muestra los resultados del comportamiento del OD y DBOC del tercer escenario planteado en una escala de 10 colores.

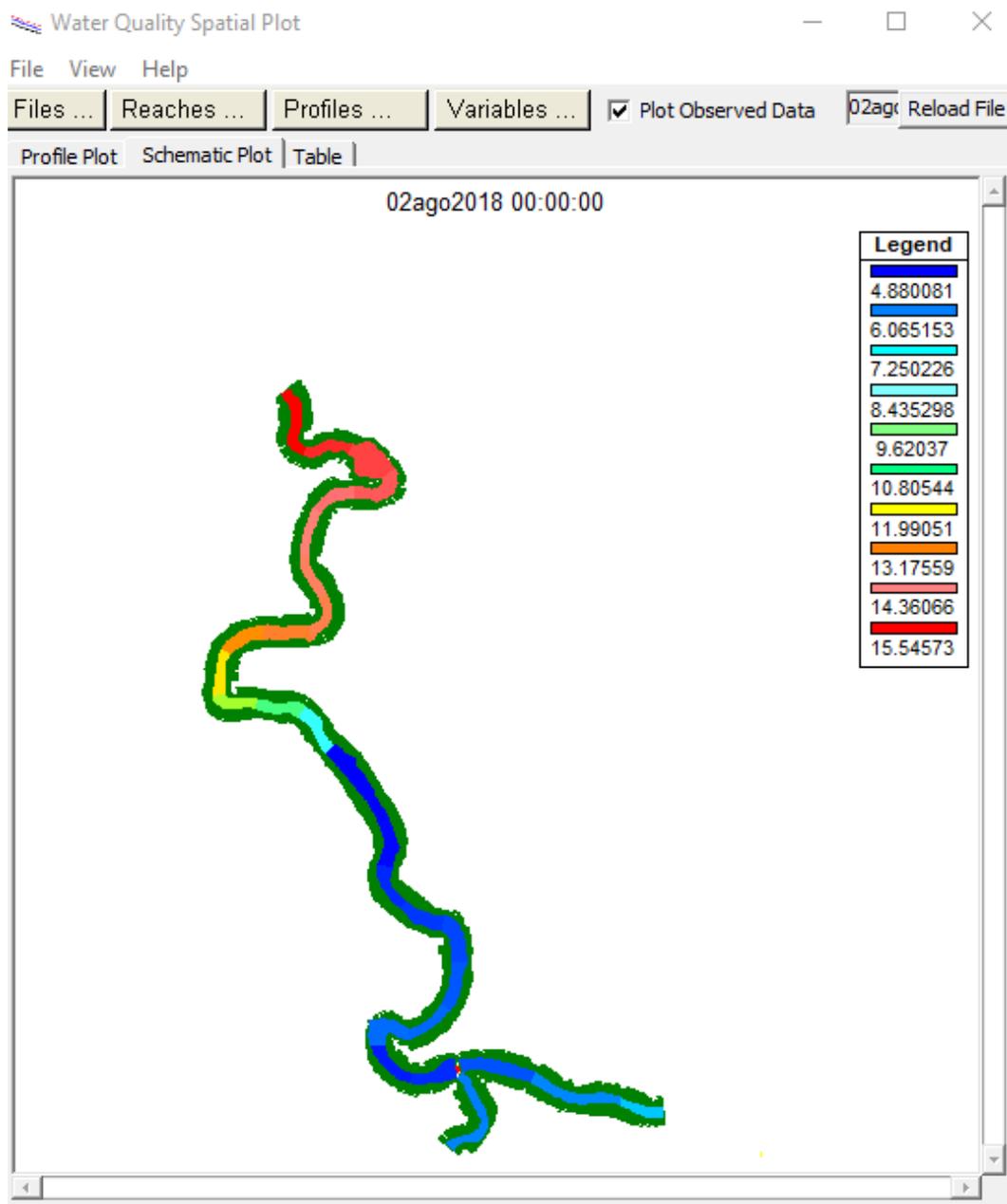


Figura 108. Comportamiento del OD del escenario 3. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

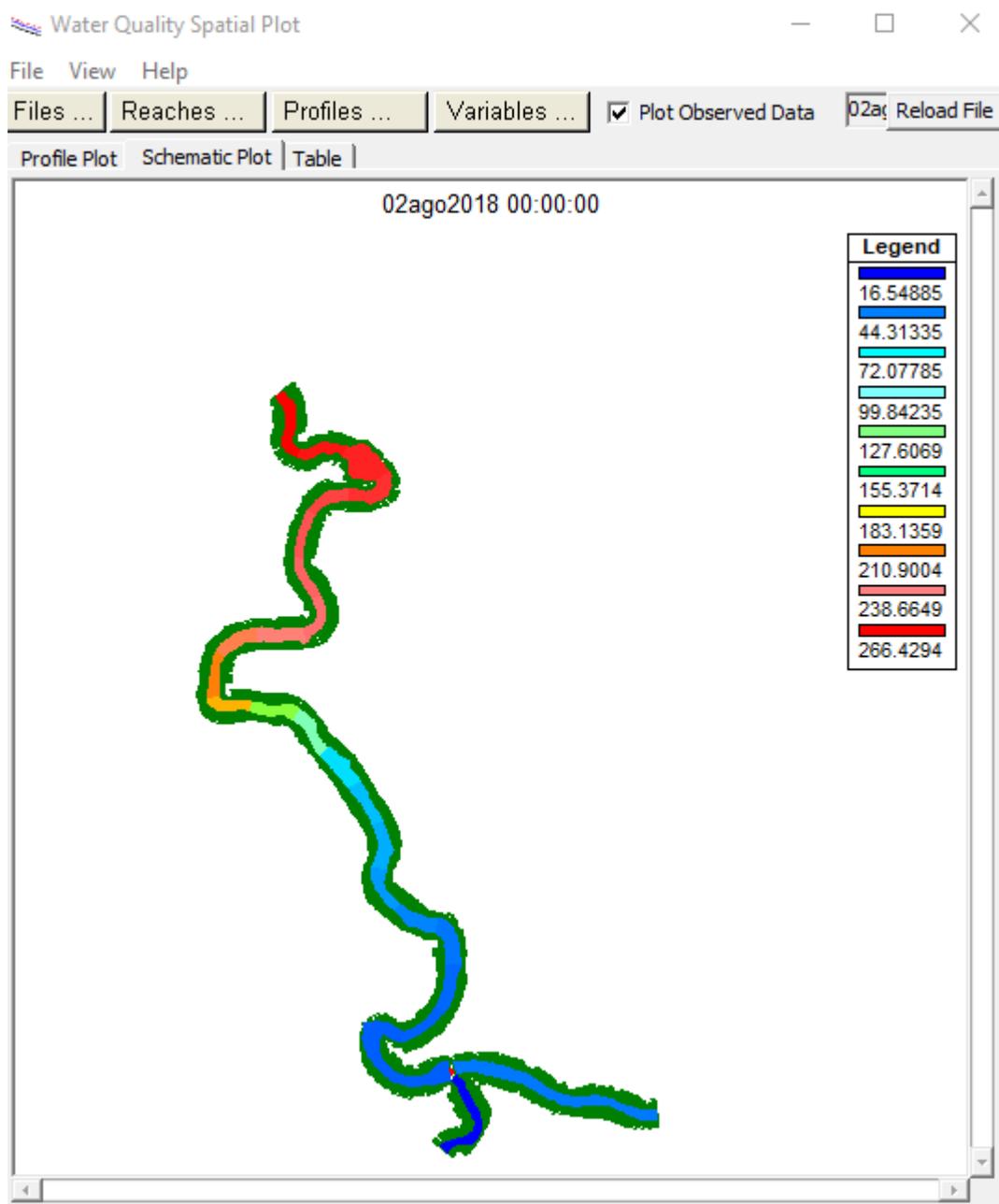


Figura 109. Comportamiento de la DBOC del escenario 3. Fuente: HEC-RAS 5.0.6

11.2 Análisis de los resultados en términos de calidad del agua (normatividad vigente)

Se describe la normatividad de la calidad hídrica que aplica en el río Lindo y la quebrada La Pilama.

11.2.1 Acuerdo 043 del 2006 CAR (por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020)

El consejo Directivo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, establecen metas, programas, proyectos y actividades para realizar un avance en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos de las aguas residuales descargadas a la cuenca del río Bogotá, planteando metas alcanzables para el año 2020.

La subcuenca del río Lindo al pertenecer a la cuenca del río Bogotá aplica este acuerdo de proyección de parámetros de calidad hídrica, de esta manera la CAR define que la subcuenca del río Lindo comprendida por el río y sus afluentes, desde su cabecera hasta la desembocadura del río Calandaima, corresponden a la clase I (corresponde a los valores de los usos del agua para consumo humano y domestico con tratamiento convencional, preservación de flora y fauna, uso agrícola y uso pecuario)³².

En la tabla 94 se describe si se cumple con este acuerdo para los datos tomados en campo y analizados en el laboratorio. Para los escenarios planteados 1, 2 y 3 el río Lindo no cumple con esta norma para que sea clase I, como se puede observar anteriormente en los resultados aguas abajo la concentración de DBO₅ es mayor a la determinada por la CAR de 7 mg/l. La DBO₅ para los escenarios son: en la primera simulación varía entre 10.85 mg/l a 14.27 mg/l, en la segunda simulación entre 11.80 mg/l a 13.87 mg/l y para el tercer simulación concentraciones entre 62.18 mg/l a 77.81 mg/l.

³² Acuerdo 043 del 2006. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

Tabla 94. Aplicación del acuerdo 043/2006-CAR para los puntos de muestreo analizados en el laboratorio.

Punto de muestreo	Acuerdo 043/2006-CAR		Cumple
	Valor más restrictivo (Máx.)		
P.1 Río Lindo 1 (K0+576.48)			
DBO ₅ (mg/l)	11.65	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	7.086	4 (mg/l)	Si
P.2 Río Lindo 1 (K0+035.13)			
DBO ₅ (mg/l)	8.74	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	7.1836	4 (mg/l)	Si
P.3 Río Lindo 2 (K3+105.32)			
DBO ₅ (mg/l)	11.65	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	5.727	4 (mg/l)	Si
P.4 Río Lindo 2 (K2+945.24)			
DBO ₅ (mg/l)	10.19	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	6.601	4 (mg/l)	Si
P.5 Río Lindo 2 (K2+594.99)			
DBO ₅ (mg/l)	11.65	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	5.63	4 (mg/l)	Si
P.6 Río Lindo 2 (K1+355.00)			
DBO ₅ (mg/l)	13.10	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	6.116	4 (mg/l)	Si
Q.9 La Pilama (K0+279.36)			
DBO ₅ (mg/l)	14.56	7 (mg/l)	No
OD (mg/l)	5.63	4 (mg/l)	Si

Fuente: elaboración propia

11.2.2 Decreto 3930 de 2010 (Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones)

Su objetivo establecer las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Este decreto establece los parámetros de los modelos de simulación de la calidad del recurso hídrico, permitiendo modelos de simulación existentes que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables, utilizando por los menos los siguientes parámetros (DBO, DQO, SS, pH, T, OD, entre otros); los cuales están al alcance de este proyecto son la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto.

11.2.3 Resolución 0631 de 2015 (por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones)

El objetivo de esta resolución establecer los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberían cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Esta busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, con el fin de aportar al mejoramiento de la calidad del agua de los recursos hídricos. Para este estudio se localizaron cinco descargas representativas a lo largo de la corriente. Ver tabla 95.

Para los escenarios 1 y 2 se plantearon usando las mismas concentraciones obtenidas en campo, se evidencia que los vertimientos de aguas residuales domesticas van directamente al río sin ningún control, esta contaminación se refleja en la calidad aguas abajo del cauce, es decir, no están cumpliendo con los valores límites máximos permisibles descritos en esta resolución. Para el escenario 3 se elaboró para que cumpla esta norma interceptando las descargas que entrega el municipio a la PTAR.

Tabla 95. Aplicación de la resolución 0631/2015 para las descargas analizadas en el laboratorio

Descargas		Resolución 0631/2015 Valor (Máx. permisible)	Cumple
D.7 Río Lindo 1 (K0+415.11)			
DBO ₅ (mg/l)	198.03	90 (mg/l)	No
DQO (mg/l)	205.714	180 (mg/l)	No
D.8 Río Lindo 1 (K0+224.99)			
DBO ₅ (mg/l)	17.474	90 (mg/l)	Si
DQO (mg/l)	51.429	180 (mg/l)	Si
D.10 Río Lindo 2 (K3+039.97)			
DBO ₅ (mg/l)	116.491	90 (mg/l)	No
DQO (mg/l)	274.286	180 (mg/l)	No
D.11 Río Lindo 2 (K2+605.01)			
DBO ₅ (mg/l)	29.123	90 (mg/l)	Si
DQO (mg/l)	68.571	180 (mg/l)	Si
D.12 Río Lindo 2 (K2+594.99)			
DBO ₅ (mg/l)	93.193	90 (mg/l)	No
DQO (mg/l)	205.714	180 (mg/l)	No

Fuente: elaboración propia

12 CAPITULO Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en el presente estudio de modelación de calidad del agua del río Lindo y que se tomaron como base para presentar recomendaciones.

12.1 Conclusiones

El programa HEC-RAS, es una herramienta versátil para el usuario porque permite ingresar, editar y modificar datos geométricos, hidráulicos y de calidad del agua y de sedimentos que permiten construir modelos de flujo a superficie libre en ríos en una o dos dimensiones y modelos de calidad en una dimensión. Con dichos modelos es factible realizar estudios para diversas condiciones en el flujo y diferentes valores de descargas de contaminantes a la corriente. Además, del fácil uso del programa, la interpretación de los resultados es sencilla ya que se visualizan en tablas y gráficas.

El módulo de calidad del agua del HEC-RAS, es una herramienta útil para el análisis y predicciones de diversos escenarios de calidad del agua en ríos, siempre y cuando se tenga un modelo bien calibrado, a partir de una completa información levantada en actividades de campo como: topografía y batimetría, aforos, ensayos de trazadores y toma de muestras para caracterizar los parámetros de calidad del agua a modelar.

Se desarrolló el modelo de calidad del agua sobre el río Lindo en el municipio de Viotá, utilizando el programa HEC-RAS QUALITY para simular los parámetros de DBOC y OD, para diferentes escenarios en condiciones actuales y futuras.

Dentro de la recolección de información secundaria, se obtuvieron planos topográficos y batimétricos detallados del río Lindo y de la Quebrada La Pilama, los cuales fueron suministrados por la CAR para la elaboración del modelo hidráulico.

Como información primaria, se realizó una campaña de aforos en 5 puntos de monitoreo, utilizando el método por vadeo. Para las mediciones de la velocidad de flujo se utilizó el equipo Flowtracker 2.

En la misma salida de campo, se realizaron dos ensayos de trazadores, uno sobre el río Lindo y otro sobre el mismo cuerpo de agua después de la confluencia con la quebrada La Pilama, para de esta forma tener en cuenta el aumento de caudal por el

afluente. La sustancia utilizada como trazador fue Cloruro de Sodio (NaCl). Los ensayos, se consideran válidos con esta sustancia siempre y cuando el estado de ganancia estable (SSG) se encuentra en el rango de 0.95 a 1.05. Para el presente estudio se logró un SSG de 1.03 en el río Lindo y un SSG de 1.017 en el ensayo realizado después de la confluencia con La Pilama, por lo tanto, los ensayos son válidos. En los ensayos se midió la conductividad del agua mediante sondas multiparamétricas ubicadas en dos puntos ubicados aguas abajo del punto de descarga de NaCl. Utilizando esta metodología se determinaron los tiempos de viaje, información que se aprovechó para la toma de muestra en el cuerpo de agua y para la calibración del modelo.

Punto de muestreo	Hora
P.1	00:27:00 a. m.
P.2	5:17:00 a. m.
P.3	5:20:00 a. m.
P.4	6:14:00 a. m.
P.5	8:27:00 a. m.
P.6	01:11:00 p. m.

Después de realizar el ensayo de trazados, se procedió a la toma de muestras en el río Lindo, el tipo de muestra que se tomó fue puntal, es decir, en un lugar representativo en el centro del cauce, donde se evidenciaba que la corriente fuese homogénea; en cada punto de monitoreo se extrajeron dos botellas de Winkler y un frasco de DBO, al tomar las muestras inmediatamente se aplicó 1 ml sulfato manganoso (MnSO₄), 1 ml alcalino yoduro nitrato y 1 ml de ácido sulfúrico, con el fin de fijar el oxígeno disuelto en las botellas de Winkler.

El análisis de los parámetros físico-químicos se llevó a cabo en el Laboratorio de Aguas del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, aplicando los métodos de Winkler y el titulométrico de reflujo cerrado para las muestras tomadas en el río Lindo, la quebrada La Pilama y en los vertimientos de aguas residuales observados, los cuales se aforaron por el método volumétrico.

Con los datos obtenidos de los análisis realizados en el laboratorio a las muestras de los vertimientos, se determinó que no cumplen con lo establecido en la resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible porque superan el valor máximo permisible DBO_5 de 90 mg/l. La concentración obtenida para estos vertimientos es: D7 (DBO_5 de 198.03 mg/l), D10 (DBO_5 de 116.49 mg/l), y D12 (DBO_5 de 93.19 mg/l).

Para la calibración del modelo hidráulico se utilizó la información obtenida en campo con los aforos por vadeo. Los datos de velocidad media del flujo y altura de la lámina del agua medida en tres (3) secciones transversales:

Tramo	Sección transversal HEC-RAS	Caudal medido (m³/s)	Lámina del agua medida (m)	Lámina del agua calculada (m)
Quebrada Pilama	K0 + 021.22	0.147	0.29	0.29
Río Lindo 1	K0 + 020.52	0.087	0.327	0.32
Río Lindo 2	K1 + 350.29	0.486	0.402	0.4

Para la calibración se varió el coeficiente rugosidad de Manning hasta obtener para el tramo del río Lindo un coeficiente de 0.51 con un error del 3.03% en la altura de agua y la velocidad, para la quebrada La Pilama de 0.28 y para el río Lindo aguas debajo de la confluencia de 0.17. Para estos dos últimos tramos sin error.

Con el modelo hidráulico calibrado, se procedió a la calibración del modelo de calidad del agua del río Lindo. Para esto se utilizó la información obtenida como resultado de los ensayos de laboratorio sobre las muestras tomadas en campo y se ejecutaron 78 simulaciones con el HEC-RAS QUALITY de los parámetros DBOC y OD. Para cada simulación se asignaron valores de los coeficientes de desoxigenación (K_1), la tasa de pérdida de DBOC por sedimentos (K_3), coeficiente de reaireación (K_2) y consumo béntico de oxígeno (K_4). Los valores iniciales de las tasas para los tanteos se determinaron así: K_1 se calculó a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio y para las demás tasas se calcularon a partir de las expresiones presentadas en el marco conceptual de este documento. Para identificar que tasas nos entregaron el mejor ajuste posible, se determinó la diferencia entre los valores calculados con el programa y los medidos sobre las muestras tomadas en el río de OD y DBOC. La diferencia se

dividió por el valor medido en el punto de muestreo y se multiplicó por 100 para así, obtener el porcentaje de error para cada punto de muestreo. Luego se sumaron los errores en todos los puntos analizados. Las tasas se modificaron una a una para observar el comportamiento del error total obtenido y la sensibilidad de los resultados a la variación de cada tasa. Procediendo de esa manera se logró ir disminuyendo el error total, tomando como valores de calibración el que reportó el menor promedio obtenido. A continuación, se muestran el valor inicial y el valor ajustado de cada coeficiente.

Símbolo	Descripción	Unidad	Valor inicial	Valor ajustado
K₁	Coeficiente de desoxigenación	día ⁻¹	0.024	0.030
K₂	Coeficiente de reaireación	día ⁻¹	1.918	1.9
K₃	Tasa de pérdida de DBOC por sedimentos	día ⁻¹	0	0
K₄	Consumo béntico de oxígeno	día ⁻¹	1.2	0.3

Para mejorar los resultados, además, se realizó el ajuste de la longitud de las celdas para la solución numérica de las ecuaciones de transporte, que permitieron disminuir el promedio de error que se calculó con la diferencia entre los valores calculados por el programa y los medidos en campo; la longitud de la celda se cambió de 100 a 120 metros obteniendo un promedio de error para el OD de 4.61% a 4.65% y para DBOC de 27.40% a 27.13%.

Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio practicados a las muestras tomadas en el trabajo de campo sobre el río Lindo el primero (1) de agosto del año 2018 se puede concluir que la DBO₅ no cumple con el Acuerdo número 43 del 17 de octubre de 2006 de la CAR, en donde especifican que el valor máximo restrictivo de DBO₅ de 7mg/l; ya que la concentración de DBO₅ varía entre 8.74 mg/l a 13.10 mg/l a lo largo del cauce, es superior a las definida por la CAR. Además, los resultados de la modelación con los datos de calibración indican que en el tramo en estudio los valores obtenidos aguas abajo tampoco cumple con el Acuerdo 43.

Después de calibrar el modelo de calidad de agua, se procedió a simular un primer escenario en condiciones de estiaje sobre el río Lindo, el cual consiste en modelar un caudal hidrológico para condiciones secas. Para este propósito se determinó el 7Q₁₀ y se adoptó este como el caudal que recibe los vertimientos de aguas residuales actuales del municipio (1/08/2018), obteniéndose resultados favorables en el OD ya que el modelo arroja valores entre 4.86 mg/l a 6.25 mg/l y para la DBOC muestra incremento aguas abajo, alcanzando un valor de 48.84 mg/l

El segundo escenario planteado, se desarrolló para un caudal mínimo semanal circulante en el cuerpo de agua y el caudal para los vertimientos se estimó a partir de la proyección de la población a 25 años del municipio de Viotá, manteniendo concentraciones de OD y DBOC iguales a las determinadas en el trabajo de campo. El modelo arrojó resultados que hacen prever que las descargas entregadas como escenario futuro de descargas entregadas directamente al cauce principal, continuarán ocasionando el deterioro de la calidad del agua del río Lindo. El modelo indica que a lo largo del cauce se tendrá una tendencia de incremento de la DBOC. El valor más alto obtenido de la DBOC es de 47.62 mg/l (3690.57 m aguas abajo desde el punto de control) y la concentración de OD varía entre 5.81 mg/l a 6.47 mg/l.

El tercer escenario planteado, contempla la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), y de unos colectores que intercepte los vertimientos, es decir un sistema que recoja las aguas residuales del municipio y les dé un tratamiento que cumpla con la normatividad vigente. En consecuencia, las cargas adoptadas corresponden a las cargas máximas permitidas. El caudal modelado en este escenario fue el 7Q₁₀. Los resultados obtenidos demuestran que se requiere la construcción de una PTAR con tratamientos secundarios y con remoción del 80% de DBO, con el fin de evitar la contaminación de su recurso hídrico.

12.2 Recomendaciones

Se recomienda para este tipo de trabajo realizar tres campañas de monitoreo (para condiciones húmedas, medias y secas), en la que se deben incluir aforos de caudales en cada una de las condiciones. Adicionalmente, se debe realizar los ensayos de trazadores para obtener los tiempos de viaje de la masa de agua en cada caso, con el fin de verificar que los resultados obtenidos en el modelo correspondan a los determinados en campo mejorando la calibración de este y que modele las características hidrodinámicas y de calidad del cauce.

Se recomienda el uso de la rodamina para el ensayo de trazadores en ríos donde se evidencia aguas residuales, ya que la conductividad se puede ver afectada en estos casos y la aportada por el cloruro de Sodio sea afectada.

Se recomienda tomar muestras suficientes para tener respaldos de las mismas, necesarias en casos de fallos involuntarios en los ensayos. Es muy recomendable utilizar equipos como el OxiTop para tener información sobre la evolución de la DBO en el tiempo, en estos equipos se puede, almacenar y observar los datos de variación de la demanda de oxígeno en las muestras y presentar los resultados en gráficos. Además, se puede hacer un análisis comparativo con resultados obtenidos por el método de Winkler. Con estos equipos se puede obtener de forma más certera la tasa de desoxigenación K_1 .

A partir de los resultados obtenidos, es clara la necesidad de plantear un proyecto de alcantarillados que intercepte las descargas de AR y proyectar una PTAR con tratamiento secundario. Otra posibilidad para preservar la calidad del agua en la región es buscar una ubicación alternativa para la PTAR de forma que la descarga del efluente se realice luego de la confluencia del río Lindo con el río Calandaima.

Bibliografía

Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006, por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. (2006). Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. Bogotá, D.C.

Alvarado, D. (2011, julio). Aplicación de un modelo de transporte de solutos en el análisis de la hidrodinámica y el transporte de las concentraciones contaminantes en un hidrosistema urbano en Bogotá (tesis de maestría). Maestría en ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá

Camacho, L. (2020, julio). Procesos y modelos de transporte de solutos y experimentos con trazadores. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Universidad de los andes.

Castaño, J. (2015). Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá (tesis de maestría). Maestría en ingeniería recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Castillo, J. Modelos de calidad del agua.

Corporación Autónoma Regional, (2014). Elaboración del diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Calandaima – 2120-03. Bogotá, D.C.

Corporación Autónoma Regional, (2015, junio). Generalidades municipio Viotá. Bogotá, D.C.

DANE. (2018). Censo General 2018. Municipio de Viotá, Cundinamarca.

Guano, M.& Velasteguí, V. (2014, septiembre). Manual básico para la modelación numérica de la calidad del agua en ríos: programa computacional HEC-RAS versión 4.0. ejemplo de aplicación a un tramo del río Machángara dentro de la zona de influencia de la ciudad de Quito (Ingeniero ambiental). Escuela Politécnica Nacional.

Jiménez, C. (2017). Caracterización morfométrica y diagnóstico del recurso hídrico del río en el municipio de Viotá, Cundinamarca. (tesis de especialización). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.

Manual del usuario HEC-RAS, (2016). Capítulo 19: modelación de calidad del agua.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales. Bogotá, D.C.

Modelo computacional. Instituto Nacional de Bioingeniería e imágenes Biomédicas. (2016). Recuperado de <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/modelado-computacional> del 24 de octubre de 2020.

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000, Sección II Título E, Tratamiento de aguas residuales. (2000, noviembre). Ministerio de desarrollo económico. Colombia

Resolución 0330 de 2017, por el cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. (2017). Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Colombia

Resolución 0631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. (2014). Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Colombia

Reyes, C. & Ruiz, L. (2017). Diagnóstico de la calidad del agua mediante cálculo de un ICA y modelación de un tramo del río Tunjuelo en el sector de Bosa Libertador. Facultad de ingeniería, universidad católica de Colombia. Bogotá, D.C.

Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín. Ediciones de la U.

Silva, D. & Ayala, E. (2019). Diagnóstico del acueducto del municipio de Viotá desde las bocatomas hasta la planta de tratamiento. Facultad de ingeniería civil, Universidad Católica de Colombia. Bogotá, D.C.