

Maestría en Ingeniería Civil

**Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo,
municipio de Viotá en el Departamento de Cundinamarca,
Colombia**

Everth Aníbal Vizcaíno Godoy

Bogotá, D.C., 02 de agosto de 2021



**Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo,
municipio de Viotá en el 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., 02 de agosto de 2021



La tesis de maestría titulada “Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo, municipio de Viotá en el Departamento de Cundinamarca, Colombia”, presentada por Everth Aníbal Vizcaíno Godoy, 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
Ing. Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado
Dr. Germán R. Santos G.

Jurado
Dr. Jairo A. Romero R.

Bogotá, D.C., 02 de agosto de 2021

Dedicatoria

A Lilián, mi amada esposa,
a mis hijas Kiara y Sarah,
que pacientemente alentaron las jornadas de trabajo,
que con su amor, alegría y motivación,
enaltecieron los deseos y energías para continuar
sin desfallecer.

Agradecimientos

A las diferentes personas que con sus aportes de tiempo y dedicación, moldearon en su justa medida el ayudar a realizar este logro. A todos ellos gracias, en especial al equipo humano del Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la Escuela Colombiana de Ingeniería; por facilitar los equipos, materiales, ayudar en los trabajos de campo como fueron la toma de muestras, las mediciones con los diferentes equipos, por el tiempo dedicado a estas actividades así como el apoyo logístico durante la realización de los diferentes ensayos en el laboratorio, a todos ellos, nuevamente unas infinitas gracias. Al Ing. Héctor Matamoros, por su tiempo y oportunos apuntes de experiencia que enriquecieron este trabajo de grado. A Keila Núñez, compañera de batallas técnicas y filosóficas, coautora en el desarrollo del tema de los presentes trabajos de grado, (ella con el software HEC-RAS), que con el oportuno e inesperado encuentro en el campus (laboratorios), no hubiera sido posible materializar este trabajo de grado de Maestría, a ella, gracias por la oportunidad ofrecida.

Resumen

El agua como recurso renovable y elemento esencial para el desarrollo de la vida como la conocemos en el planeta Tierra, contrasta con las fuerzas antrópicas de contaminación por diferentes fuentes, donde el aumento poblacional es uno de los retos a seguir, para que como especie no sufra una escasez en cantidad y calidad, de los cuales, el vertido de aguas residuales como contaminante, es uno de los retos de mayor relevancia en gestionar en el adecuado uso del recurso para que mantenga su calidad a través del tiempo.

Es una característica que los asentamientos poblacionales a la ribera de los cuerpos de agua terminen entregando los vertidos contaminantes sin ningún control, y que las políticas ambientales y de normatividad vigente exigen que se deben contener y depurar para así ser entregados en mejores condiciones de calidad. Existen diferentes parámetros de la calidad del agua que indican que tan buena o mala puede ser, entre ellos, la demanda básica de oxígeno DBO, y el oxígeno disuelto OD son indicadores primordiales para determinar qué nivel de oxigenación contiene y así describir el grado de contaminación a que está expuesto el cuerpo de agua. Para este trabajo de grado se modelarán dos parámetros que están estrechamente ligados, la DBO y la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (total) DBOC.

Es de vital importancia contar con datos de campo, para lo cual, se realizaron campañas de medición de caudales, de trazadores y la toma de muestras de calidad para la determinación de los parámetros de oxígeno disuelto OD y DBOC en sitio como los correspondientes ensayos de laboratorio para determinar las tasas de degradación o decaimiento del oxígeno. La modelación se realizó en el programa IBER en su versión 2.6 y una vez realizada la calibración hidrodinámica con el trazador, se procedió a realizar la calibración y el modelado de calidad.

El municipio de Viotá tiene su urbanismo en las riberas del río Lindo, se identificaron hasta 12 descargas de aguas residuales, de las cuales 5 se clasificaron por su cantidad y continuidad del vertido que son las que se modelan. De acuerdo con el plan de desarrollo

del municipio, se tiene proyectado construir una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada a aproximadamente a 1.3 km aguas abajo del casco urbano.

Para el presente estudio se evaluaron las condiciones de los vertidos actuales y su impacto en la zona de implantación de la PTAR, así mismo se evaluó como lo exige la normatividad actual, el modelar las condiciones de contaminación para caudales mínimos, tanto para las condiciones actuales de vertimientos, como la condición de la PTAR operando, de tal forma que se modeló el grado de contaminación del río Lindo en la sección de salida del modelo que corresponde con la confluencia con el río Calandaima. Se definieron cuatro escenarios de modelado de calidad, tres de ellos modelando los vertidos actuales y el cuarto modelando la descarga de la PTAR.

Se resalta la bondad computacional del programa IBER en el tiempo de realizar cálculos, dado que para la versión 2.6, tiene implementado un modelo de cálculo computacional en paralelo utilizando arquitectura tipo CUDA, que viene implementada en las tarjetas de video de los equipos computacionales, cuya novedad en esta versión es que está habilitada para modelos de calidad y para diferentes parámetros. Es así como se pasó de realizar modelados de calidad en la versión 2.5 en días a pasar a horas en la versión 2.6, que ayudó enormemente a modelar y ajustar los modelos realizados.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	18
1.1.	OBJETIVOS	19
1.1.1	<i>Objetivo general</i>	19
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	CONCEPTOS BÁSICOS Y MARCO TEÓRICO	21
2.1	ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA	21
2.1.1	<i>Aguas residuales</i>	21
2.1.2	<i>Aguas residuales domesticas (ARD)</i>	22
2.1.3	<i>Aguas residuales municipales</i>	22
2.1.4	<i>Aguas crudas</i>	22
2.1.5	<i>Aguas negras</i>	22
2.2	MECANISMOS DE TRANSPORTE	22
2.2.1	<i>Advección</i>	23
2.2.2	<i>Difusión</i>	23
2.2.3	<i>Dispersión</i>	24
2.3	MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	25
2.3.1	<i>Utilidad de los modelos de calidad del agua</i>	25
2.3.2	<i>Tipos de estudios</i>	26
2.4	PARÁMETROS ANALIZADOS	28
2.4.1	<i>Oxígeno disuelto (OD)</i>	28
2.4.2	<i>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</i>	29
2.4.3	<i>Formulación de la DBO</i>	30
2.4.4	<i>Comportamiento del OD y la DBO en un cuerpo de agua</i>	31

2.5	DESCRIPCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL IBER	39
2.5.1	<i>Programa IBER</i>	41
2.5.2	<i>Esquemas numéricos</i>	42
2.5.3	<i>Modelo de cálculo hidrodinámico</i>	42
2.5.4	<i>Condiciones de contorno hidrodinámicas</i>	45
2.5.5	<i>Capacidad de modelación de calidad de agua</i>	48
2.5.6	<i>Modelo de transporte</i>	49
2.5.7	<i>Términos fuente</i>	51
2.5.8	<i>Modelo de Temperatura</i>	51
2.5.9	<i>Materia orgánica carbonosa</i>	52
2.5.10	<i>Nitrógeno orgánico</i>	53
2.5.11	<i>Nitrógeno amoniacal</i>	54
2.5.12	<i>Nitratos</i>	54
2.5.13	<i>Oxígeno disuelto</i>	55
2.5.14	<i>Escherichia Coli</i>	56
2.5.15	<i>Parámetros constantes en el modelo de calidad</i>	57
3	MARCO LEGAL	58
4	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	60
4.1	LOCALIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	60
4.2	CLIMATOLOGÍA.....	64
4.2.1	<i>Precipitación media mensual multianual</i>	65
4.2.2	<i>Temperatura media mensual multianual</i>	66
4.2.3	<i>Humedad relativa media mensual multianual</i>	67
4.2.4	<i>Brillo solar</i>	68
4.2.5	<i>Caracterización climática</i>	69

4.3	GEOLOGÍA	69
4.3.1	<i>Estratigrafía</i>	70
4.4	DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO	71
5	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SALIDA DE CAMPO Y LABORATORIO	77
5.1	ACTIVIDADES PRELIMINARES	77
5.2	AFORO	79
5.2.1	<i>Datos obtenidos del Flowtracker 2</i>	80
5.2.2	<i>Método volumétrico descargas</i>	89
5.3	CONDUCTIVIDAD	92
5.4	TIEMPO MEDIO DE VIAJE DEL TRAZADOR	94
5.5	CALIBRACIÓN EQUIPOS DE MEDICIÓN PARA EL TRAZADOR	96
5.5.1	<i>Calibración Sonda 1 – Agua Destilada</i>	97
5.5.2	<i>Calibración Sonda 1 – Agua Río Lindo</i>	98
5.5.3	<i>Calibración Sonda 2 – Agua Destilada</i>	99
5.5.4	<i>Calibración Sonda 2 – Agua Río Lindo</i>	100
5.6	VALORES DEL TRAZADOR	101
5.6.1	<i>Tramo 2-3</i>	101
5.6.2	<i>Tramo 4-6</i>	102
5.7	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL	102
5.7.1	<i>Marco teórico</i>	102
5.7.2	<i>Resultados Tramo 1-2-3</i>	106
5.7.3	<i>Resultados Tramo 4-5-6</i>	107
5.8	COEFICIENTE DE MANNING	108
5.9	PLAN DE MUESTREO	109

5.9.1	<i>Diseño de la red de monitoreo</i>	109
5.9.2	<i>Muestreo</i>	110
5.10	RESULTADOS DEL LABORATORIO	111
5.11	ESTIMACIÓN DE TASA DE OXIDACIÓN DBOC.....	119
5.12	MÉTODO DE THOMSON PARA EL K_1	120
5.13	ESTIMACIÓN TASA DE OXIDACIÓN K_D	124
5.14	ESTIMACIÓN TASA DE SEDIMENTACIÓN K_S	124
5.15	ESTIMACIÓN DE TASA DE AIREACIÓN K_A	126
5.16	CORRECCIÓN POR TEMPERATURA	126
5.17	DEMANDA DE OXÍGENO DE SEDIMENTO	127
5.18	RESUMEN DE LOS COEFICIENTES	127
6	MODELACIÓN: COMPONENTE HIDRÁULICO	128
6.1	DATOS METEOROLÓGICOS	128
6.2	DATOS DE CALIDAD DEL AGUA.....	129
6.3	FUENTE DE LA INFORMACIÓN.....	130
6.4	GEOMETRÍA DEL MODELO	132
6.5	CONDICIONES DE FRONTERA	135
6.6	COEFICIENTE DE MANNING	137
6.7	CONFIGURACIÓN INICIAL DE PARÁMETROS DEL MODELO	138
6.7.1	<i>Parámetro de tiempo</i>	138
6.7.2	<i>Parámetros Generales</i>	139
6.7.3	<i>Turbulencia</i>	141
6.8	CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.....	141
6.8.1	<i>Sección 5-5 – PTAR</i>	142

6.8.2	<i>Sección 4-4 – Q. Pilama</i>	146
6.8.3	<i>Sección 2-2 – Río Lindo arriba</i>	150
6.9	RESUMEN DE RESULTADOS.....	153
7	MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD	154
7.1	DESARROLLO DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA	155
7.2	CALIBRACIÓN	156
7.2.1	<i>Grupo A Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.1</i>	157
7.2.2	<i>Grupo B Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.5</i>	158
7.2.3	<i>Grupo C Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.7</i>	160
7.2.4	<i>Grupo D Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 1.0</i>	161
7.2.5	<i>Grupo A Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.1</i>	163
7.2.6	<i>Grupo B Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.5</i>	165
7.2.7	<i>Grupo C Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.7</i>	166
7.2.8	<i>Grupo D Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 1.0</i>	168
7.3	RESUMEN DE RESULTADOS.....	170
7.4	VALIDACIÓN DEL VALOR ADOPTADO	171
8	SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS	173
8.1	ESCENARIOS PLANTEADOS.....	173
8.2	ESCENARIO NO. 1	174
8.2.1	<i>Caudales base</i>	174
8.2.2	<i>Condiciones atmosféricas</i>	174
8.2.3	<i>Valor base de OD</i>	178
8.2.4	<i>Valor base de DBOC</i>	178
8.2.5	<i>Valor base de temperatura</i>	179

8.2.6	<i>Valor base de demanda de oxígeno de sedimento</i>	180
8.2.7	<i>Descargas con carga contaminante.</i>	180
8.3	ESCENARIO NO. 2	181
8.3.1	<i>Caudales por incorporar al modelo</i>	182
8.3.2	<i>Descargas con carga contaminante.</i>	182
8.4	ESCENARIO NO. 3	182
8.4.1	<i>Descargas con carga contaminante.</i>	183
8.5	ESCENARIO NO. 4	184
8.5.1	<i>Caudal futuro de vertimiento</i>	184
8.6	ASIGNACIÓN DE CARGA CONTAMINANTE.....	186
8.7	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN TÉRMINOS DE CALIDAD DEL AGUA (NORMATIVIDAD VIGENTE).	187
8.8	RESULTADOS DEL ESCENARIO NO. 1	188
8.8.1	<i>Lámina de agua</i>	188
8.8.2	<i>DBOC</i>	189
8.8.3	<i>OD</i>	190
8.9	ESCENARIO NO. 2	193
8.9.1	<i>Lámina de agua</i>	193
8.9.2	<i>DBOC</i>	194
8.9.3	<i>OD</i>	195
8.10	ESCENARIO NO. 3	198
8.10.1	<i>Lámina de agua</i>	198
8.10.2	<i>DBOC</i>	199
8.10.3	<i>OD</i>	201
8.11	ESCENARIO NO. 4	204

8.11.1	<i>Lámina de agua</i>	204
8.11.2	<i>DBOC</i>	205
8.11.3	<i>OD</i>	208
9	CONCLUSIONES	211
9.1	GENERALIDADES	211
9.2	ESCENARIO NO. 1	212
9.3	ESCENARIO NO. 2	214
9.4	ESCENARIO NO. 3	214
9.5	ESCENARIO NO. 4	215
9.6	CONCLUSIONES.....	216
10	RECOMENDACIONES	219
11	REFERENCIAS	221
12	ANEXOS	225

Índice de tablas

TABLA 2-1 FRICCIÓN EN LA PARED	46
TABLA 2-2 RANGO DE VALORES PARA PARÁMETROS DEL MODELO DE CALIDAD IBER.....	57
TABLA 3-1. MARCO LEGAL CONSIDERADO PARA MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA.	58
TABLA 3-2 RELACIÓN DE NORMATIVIDAD ASOCIADA A TEMAS AMBIENTALES Y DE CALIDAD DEL AGUA.....	59
TABLA 4-1.COORDENADAS GEOGRÁFICAS MUNICIPIO DE VIOTÁ	60
TABLA 4-2 ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	64
TABLA 4-3 CORRELACIÓN DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS QUE AFLORAN EN LAS CUENCAS DEL RÍO LINDO, QUEBRADAS PILAMA Y SAN JUANA.....	70
TABLA 4-4. UBICACIÓN DEL TRAMO DE LA PISCINA MUNICIPAL – SAN ANTONIO.	72
TABLA 5-1 SECCIONES DE AFORO SOBRE EL RÍO LINDO Y Q. PILAMA	79
TABLA 5-2 DATOS DE CAMPO PARA LA SECCIÓN 1-1	80
TABLA 5-3 DATOS DE CAMPO PARA LA SECCIÓN 2-2	81
TABLA 5-4 DATOS DE CAMPO PARA LA SECCIÓN 3-3	82
TABLA 5-5 DATOS DE CAMPO PARA LA SECCIÓN 4-4	82
TABLA 5-6 DATOS DE CAMPO PARA LA SECCIÓN 5-5	83
TABLA 5-7 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRAMO RÍO LINDO – SECCIÓN 1-1.	84
TABLA 5-8 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRAMO RÍO LINDO – SECCIÓN 2-2.....	85
TABLA 5-9. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRAMO RÍO LINDO – SECCIÓN 3-3.	86
TABLA 5-10. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL TRAMO RÍO LINDO – SECCIÓN 4-4.	87
TABLA 5-11. SECCIÓN TRANSVERSAL TRAMO Q. LA PILAMA – SECCIÓN 5-5.....	88
TABLA 5-12 DESCARGA No. 7 – SECTOR COGOYO.....	90
TABLA 5-13 DESCARGA No. 8 – CARRERA 12, PUENTE PEATONAL.	90
TABLA 5-14 DESCARGA No. 10 – SECTOR MATADERO.	91
TABLA 5-15 DESCARGA No. 11 – VERTIMIENTO DEL HOSPITAL.	91
TABLA 5-16 DESCARGA No. 12 – VERTIMIENTO SECTOR PISCINA CAMOA.....	92
TABLA 5-17 VELOCIDAD DE MEZCLA TRAMOS 1 A 3	94
TABLA 5-18 VELOCIDAD DE MEZCLA TRAMOS 4 A 6.....	95
TABLA 5-19 DATOS DE CORRELACIÓN SONDA 1 - AGUA DESTILADA	97
TABLA 5-20 DATOS DE CORRELACIÓN SONDA 1 - AGUA RÍO LINDO.....	98
TABLA 5-21 DATOS DE CORRELACIÓN SONDA 2 - AGUA DESTILADA	99
TABLA 5-22 DATOS DE CORRELACIÓN SONDA 2 - AGUA RÍO LINDO.....	100
TABLA 5-23 RESULTADO DE ANÁLISIS DE CDL – TRAMO 1-2-3.....	106
TABLA 5-24 RESULTADO DE ANÁLISIS DE CDL – TRAMO 4-5-6.....	108

TABLA 5-25. COEFICIENTE DE MANNING TRAMO 2 A 3	109
TABLA 5-26. MÉTODOS APLICADOS EN EL LABORATORIO DE AMBIENTAL DE LA ESCUELA	111
TABLA 5-27. OXÍGENO DISUELTUO OBTENIDO EN EL LABORATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	113
TABLA 5-28. DATOS OBTENIDOS DE DQO, DBO ₅ Y ML DE MUESTRA PARA LAS BOTELLAS DBO.....	115
TABLA 5-29 RESULTADOS DEL OXÍGENO DISUELTUO Y DBO -FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	118
TABLA 5-30 CÁLCULO DE K1 Y L0 POR MÉTODO THOMSON	121
TABLA 5-31 AJUSTE POR SOLVER	121
TABLA 5-32 ESTIMATIVO DE K _d	124
TABLA 5-33 VELOCIDADES DE PARTICULADO EN RÍOS	125
TABLA 5-34 ESTIMATIVO DE K _s	125
TABLA 5-35 ESTIMATIVO DE K _A	126
TABLA 5-36 RESUMEN DE COEFICIENTES PARA MODELO HIDRÁULICO.	127
TABLA 6-1. CAUDALES DE ENTRADA MODELO IBER	135
TABLA 6-2. RESULTADOS DE LÁMINA MODELO HIDRÁULICO	153
TABLA 7-1 DATOS MEDIDOS TRAZADOR EN CAMPO.	156
TABLA 7-2 GRUPO DE VALORES COEFICIENTES DE DIFUSIÓN Y NÚMERO DE SCHMIDT	156
TABLA 7-4 RESUMEN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN – RÍO LINDO	170
TABLA 8-1 CAUDALES BASE POR ASIGNAR AL MODELO	174
TABLA 8-2 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS – RÍO LINDO – FUENTE IDEAM	175
TABLA 8-3. COEFICIENTES DE ENTRADA – PENMAN – MONTEITH	176
TABLA 8-4. RESULTADOS DE RADIACIÓN SOLAR.....	177
TABLA 8-5 VALORES DE OD INICIAL, PARA DIFERENTES TRAMOS DEL RÍO LINDO	178
TABLA 8-6 VALORES DE DBO ₅ , INICIAL PARA DIFERENTES TRAMOS DEL RÍO LINDO.....	178
TABLA 8-7 VALORES DE DBOUC PARA LAS DESCARGAS	179
TABLA 8-8 VALORES DE TEMPERATURA, INICIAL PARA DIFERENTES TRAMOS DEL RÍO LINDO	180
TABLA 8-9 VALORES DE DBO A 5 DÍAS PARA LAS DESCARGAS PUNTUALES – RÍO LINDO.....	180
TABLA 8-10 VALORES DE DBOUC PARA LAS DESCARGAS	181
TABLA 8-11 CAUDALES MÍNIMOS POR ASIGNAR AL MODELO	182
TABLA 8-12 PROYECCIÓN DE POBLACIÓN 2018-2045.....	183
TABLA 8-13 PROYECCIÓN CAUDAL DE DESCARGAS	183
TABLA 8-14 COEFICIENTE DE MAYORACIÓN PARA CAUDAL HORARIO.....	185
TABLA 8-15 CAUDALES POR CONEXIONES ERRADAS E INFILTRACIÓN	185
TABLA 8-16 PARÁMETROS DE DESCARGA PTAR – RÍO LINDO	186

Índice de figuras

FIGURA 2-1. PROCESO DE ADVECCIÓN. FUENTE: SIERRA RAMÍREZ, CARLOS ALBERTO. 2011. CALIDAD DEL AGUA EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO. MEDELLÍN, 2011.	23
FIGURA 2-2. FENÓMENO DE DIFUSIÓN ADVECCIÓN. FUENTE: PROPIA.	24
FIGURA 2-3. FENÓMENO DE DIFUSIÓN DENTRO DE UNA SECCIÓN DE TUBERÍA ADVECCIÓN. FUENTE: SIERRA RAMÍREZ, CARLOS ALBERTO. 2011. CALIDAD DEL AGUA EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO. MEDELLÍN, 2011.	24
FIGURA 2-4. CURVA DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO. FUENTE: ROMERO JAIRO.	31
FIGURA 2-5. FENÓMENO DE AUTODEPURACIÓN. FUENTE: SÁNCHEZ, D. CALIDAD DEL AGUA EN RÍOS.	32
FIGURA 2-6. ZONAS DE INFLUENCIA DE UN VERTIDO. FUENTE: SÁNCHEZ, D. CALIDAD DEL AGUA EN RÍOS.	33
FIGURA 2-7. COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTOS EN UNA CORRIENTE DE AGUA. FUENTE: SIERRA, C. (2011). CALIDAD DEL AGUA, EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO.	35
FIGURA 2-8. ESQUEMA DE UNA CORRIENTE DE AGUA CON LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA DESCARGA. FUENTE: SIERRA, C. (2011). CALIDAD DEL AGUA, EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO.	38
FIGURA 2-9. FRICCIÓN DE PARED. PROGRAMA IBER.	47
FIGURA 2-10 CONDICIONES DE CONTORNO ENTRADA Y SALIDA.	47
FIGURA 2-11 ESQUEMA DEL MODELO DE CALIDAD DE AGUA EN IBER.	49
FIGURA 4-1 LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE VIOTÁ - CUNDINAMARCA.	61
FIGURA 4-2. LOCALIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO. ELABORACIÓN PROPIA.	62
FIGURA 4-3. LOCALIZACIÓN DETALLADA DEL RÍO LINDO. ELABORACIÓN PROPIA.	63
FIGURA 4-4. MAPA DE ESTACIONES RED CAR Y RED IDEAM – MUNICIPIO DE VIOTÁ.	65
FIGURA 4-5. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL CUENCA RÍO LINDO.	66
FIGURA 4-6. HISTOGRAMA DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL.	67
FIGURA 4-7. HISTOGRAMA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL.	68
FIGURA 4-8. BRILLO SOLAR ESTACIÓN ESC. SAMPER MADRID.	69
FIGURA 4-9 UNIDADES GEOLÓGICAS ZONALES – FUENTE INGEOMINAS.	71
FIGURA 4-10. UBICACIÓN GENERAL DEL TRAMO DE EVALUACIÓN.	73
FOTO 4-11 PANORÁMICA DEL CAUCE EN LA ZONA DE LA PTAR PROYECTADA.	76
FIGURA 5-1. UBICACIÓN EN PLANTA DE LAS SECCIONES DE AFORO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 5-2 UBICACIÓN DE DESCARGAS PRINCIPALES SOBRE RÍO LINDO - VIOTÁ.	89
FIGURA 5-3. UBICACIÓN PUNTOS DE CONTROL DE CONDUCTIVIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	93
FIGURA 5-4. DIAGRAMA DEL PASO DE LA ONDA DE CONCENTRACIÓN AGUAS ARRIBA, (CONDUCTIVIDAD VS. TIEMPO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	95
FIGURA 5-5. DIAGRAMA DEL PASO DE LA ONDA DE CONCENTRACIÓN AGUAS ABAJO, (CONDUCTIVIDAD VS. TIEMPO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	96
FIGURA 5-6 CURVA DE CALIBRACIÓN SONDA 1 – AGUA DESTILADA.	97

FIGURA 5-7 CURVA DE CALIBRACIÓN SONDA 1 – AGUA RÍO LINDO	98
FIGURA 5-8 CURVA DE CALIBRACIÓN SONDA 2 – AGUA DESTILADA.....	99
FIGURA 5-9 CURVA DE CALIBRACIÓN SONDA 1 – AGUA RÍO LINDO	100
FIGURA 5-10. NORMALIZACIÓN DE VALORES DEL TRAZADOR – TRAMOS 1 – 2 - 3.....	101
FIGURA 5-11. NORMALIZACIÓN DE VALORES DEL TRAZADOR – TRAMOS 4 – 5 - 6.....	102
FIGURA 5-12 PARÁMETROS DEL MODELO ADZ (BOTERO, 2015).....	103
FIGURA 5-13. PARÁMETROS TRAMO 1-2-3. CDL.....	106
FIGURA 5-14. PARÁMETROS TRAMO 4-5-6. CDL.....	107
FIGURA 5-15. ESTACIONES DE MUESTREO DE LA RED MONITOREO.	110
FIGURA 5-16 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS MUESTRAS PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	113
FIGURA 5-17 RESULTADOS DEL OXÍGENO DISUELTUO -FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	119
FIGURA 5-18 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.1	122
FIGURA 5-19 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.2	122
FIGURA 5-20 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.3	122
FIGURA 5-21 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.4	123
FIGURA 5-22 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.5	123
FIGURA 5-23 COMPARATIVO DE VALORES DE K1 Y L0 – P.6	123
FIGURA 6-1. PERFIL DEL CAUCE TRAMO DE MODELO.....	130
FIGURA 6-2 CURVAS DE NIVEL – TRAMO MODELO RÍO LINDO – VIOTÁ	131
FIGURA 6-3. IMAGEN RÁSTER DE ELEVACIONES – MODELO RÍO LINDO – VIOTÁ.....	132
FIGURA 6-4. DISTRIBUCIÓN DE MALLADO MODELO RÍO LINDO.	133
FIGURA 6-5. MALLA DE ELEMENTOS PARA MODELO RÍO LINDO – VIOTÁ	134
FIGURA 6-6. DETALLE DEL MALLADO GENERADO	135
FIGURA 6-7. DETALLE DE ASIGNACIÓN DE ENTRADAS DE CAUDAL	137
FIGURA 6-8. ASIGNACIÓN DE ZONAS PARA EL COEFICIENTE DE MANNING.....	137
FIGURA 6-9. PARÁMETROS DE TIEMPO CORRIDA MODELO HIDRÁULICO	138
FIGURA 6-10. PARÁMETROS GENERALES MODELO HIDRÁULICO	139
FIGURA 6-11 PARÁMETROS DE TURBULENCIA, MODELO HIDRÁULICO.....	141
FIGURA 6-12. EVOLUCIÓN PROFUNDIDAD [M] EN [949837.9, 983801, 534.35] SECCIÓN 5-5	142
FIGURA 6-13. EVOLUCIÓN PROFUNDIDAD [M] EN [949837.9, 983801, 534.35] SECCIÓN 5-5	143
FIGURA 6-14. SECCIÓN 5-5 EVOLUCIÓN COEFICIENTE MANNING	144
FIGURA 6-15. CORRELACIÓN MANNING – LÁMINA DE AGUA – RÍO LINDO SECCIÓN 5-5.....	145
FIGURA 6-16 EVOLUCIÓN VELOCIDAD [M/S] EN [949837.9, 983801, 534.35] SECCIÓN 5-5	146
FIGURA 6-17. EVOLUCIÓN PROFUNDIDAD [M] EN [950472,982756,549.5] SECCIÓN 4-4	147

FIGURA 6-18. SECCIÓN 4-4 EVOLUCIÓN COEFICIENTE MANNING	149
FIGURA 6-19. SECCIÓN 5-5 EVOLUCIÓN COEFICIENTE MANNING	149
FIGURA 6-20 EVOLUCIÓN VELOCIDAD [M/S] EN [950472,982756,549.5] SECCIÓN 4-4 CASO N=2.762	150
FIGURA 6-21. EVOLUCIÓN PROFUNDIDAD [M] EN [950879,982699,563.5] SECCIÓN 2-2	151
FIGURA 6-22 EVOLUCIÓN VELOCIDAD [M/S] EN [950879,982699,563.5] SECCIÓN 2-2	151
FIGURA 6-23. SECCIÓN 2-2	152
FIGURA 7-1 AJUSTE DEL MALLADO PARA TRAMO SECCIÓN 2-2 A SECCIÓN 3-3	155
FIGURA 7-2 AJUSTE DEL MALLADO PARA TRAMO SECCIÓN 5-5 A SECCIÓN 5-5	155
FIGURA 7-3 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA. SCHMIDT=0.1	157
FIGURA 7-4 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA.	158
FIGURA 7-5 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA. SCHMIDT=0.5	159
FIGURA 7-6 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA.	159
FIGURA 7-7 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA. SCHMIDT=0.7	160
FIGURA 7-8 NaCl PICO VS CTE. DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA. SCHMIDT = 0.7	161
FIGURA 7-9 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ABAJO. SCHMIDT=1.0	162
FIGURA 7-10 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ABAJO.	162
FIGURA 7-11 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ABAJO. SCHMIDT=0.1	164
FIGURA 7-12 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ABAJO.	164
FIGURA 7-13 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ABAJO. SCHMIDT=0.5	165
FIGURA 7-14 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ABAJO.	166
FIGURA 7-15 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ABAJO. SCHMIDT=0.7	167
FIGURA 7-16 NaCl PICO VS CTE. DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ABAJO. SCHMIDT = 0.7	167
FIGURA 7-17 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE TRAZADOR NaCl – TRAMO RÍO LINDO ARRIBA. SCHMIDT=1.0	169
FIGURA 7-18 CONCENTRACIONES PICO VS COEFICIENTE DE DIFUSIÓN – TRAMO RÍO LINDO ABAJO.	169
FIGURA 7-19 ERRORES ABSOLUTOS EN FUNCIÓN DEL CTE. DE DIFUSIÓN	171
FIGURA 7-20 VERIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN – TRAMO RIO LINDO ARRIBA	172
FIGURA 7-21 VERIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN – TRAMO RIO LINDO ABAJO	172
FIGURA 8-1 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS – RÍO LINDO.....	175
FIGURA 8-2 ASIGNACIÓN DE VALORES DE DESCARGA PARA CAUDAL, TEMPERATURA, DBO Y DBOC – RÍO LINDO.	181
FIGURA 8-3. LÁMINA DE AGUA EN LA SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 1.	188
FIGURA 8-4 MAPA DE RESULTADOS PARA LA LÁMINA DE AGUA ESCENARIO NO. 1 – RÍO LINDO.	188
FIGURA 8-5 DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 1.....	189
FIGURA 8-6 MAPA DE RESULTADOS PARA DBOC ESCENARIO NO. 1 – RÍO LINDO.....	190
FIGURA 8-7 COMPARATIVO DBOC – SECCIÓN 5-5 Y CONFLUENCIA CALANDAIMA	190

FIGURA 8-8 OD EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 1	191
FIGURA 8-9 MAPA DE RESULTADOS PARA OD ESCENARIO NO. 1 – RÍO LINDO.	191
FIGURA 8-10 COMPARATIVO OD – CONFLUENCIA CALANDAIMA	192
FIGURA 8-11 COMPARATIVO DE OD VS DBOC – CALANDAIMA ESCENARIO 1	192
FIGURA 8-12. LÁMINA DE AGUA EN LA SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 2.	193
FIGURA 8-13 MAPA DE RESULTADOS PARA LA LÁMINA DE AGUA ESCENARIO NO. 2 – RÍO LINDO.....	193
FIGURA 8-14 DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 1.....	194
FIGURA 8-15 MAPA DE RESULTADOS PARA DBOC ESCENARIO NO. 2 – RÍO LINDO.....	195
FIGURA 8-16 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	195
FIGURA 8-17 OD EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 2.....	196
FIGURA 8-18 MAPA DE RESULTADOS PARA OD ESCENARIO NO. 2 – RÍO LINDO.....	196
FIGURA 8-19 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	197
FIGURA 8-20 COMPARATIVO DE OD VS DBOC – CALANDAIMA ESCENARIO 2	197
FIGURA 8-21 LÁMINA DE AGUA EN LA SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 3.	198
FIGURA 8-22 MAPA DE RESULTADOS PARA LA LÁMINA DE AGUA ESCENARIO NO. 3 – RÍO LINDO.....	198
FIGURA 8-23 DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5 ESCENARIO 3.....	199
FIGURA 8-24 MAPA DE RESULTADOS PARA DBOC ESCENARIO NO. 3 – RÍO LINDO.....	200
FIGURA 8-25 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	200
FIGURA 8-26 OD EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 3.....	201
FIGURA 8-27 MAPA DE RESULTADOS PARA OD ESCENARIO NO. 3 – RÍO LINDO.....	202
FIGURA 8-28 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	202
FIGURA 8-29 COMPARATIVO DE OD VS DBOC – CALANDAIMA ESCENARIO 3	203
FIGURA 8-30. LÁMINA DE AGUA EN LA SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 1.	204
FIGURA 8-31 MAPA DE RESULTADOS PARA LA LÁMINA DE AGUA ESCENARIO NO. 3 – RÍO LINDO.....	205
FIGURA 8-32 DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 4 RANGO TOTAL.....	205
FIGURA 8-33. DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 4 RANGO > 90K SEGUNDOS	206
FIGURA 8-34. DBOC EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 4 RANGO > 150K SEGUNDOS	206
FIGURA 8-35 MAPA DE RESULTADOS PARA DBOC ESCENARIO NO. 4 – RÍO LINDO.....	207
FIGURA 8-36 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	208
FIGURA 8-37 OD EN MG/L SECCIÓN 5-5, ESCENARIO 4.....	208
FIGURA 8-38 MAPA DE RESULTADOS PARA OD ESCENARIO NO. 4 – RÍO LINDO.....	209
FIGURA 8-39 COMPARATIVO DBOC – CONFLUENCIA CALANDAIMA	209
FIGURA 8-40 COMPARATIVO DE OD VS DBOC – CALANDAIMA ESCENARIO 4	210
FIGURA 9-1 COMPARATIVO DBO ₅ – ESCENARIO 1	213

FIGURA 9-2 COMPARATIVO DBO_5 – ESCENARIO 2	214
FIGURA 9-3 COMPARATIVO DBO_5 – ESCENARIO 3	215
FIGURA 9-4. COMPARATIVO DBO_5 – ESCENARIO 4	216

Índice de anexos

ANEXO 1	MODELO CALIDAD (IBER V.2.6).....	225
ANEXO 2	DATOS DE CAMPO	225
ANEXO 3	FOTOS	225
ANEXO 4	MAPAS	225
ANEXO 5	HOJAS DE CÁLCULO	225
ANEXO 6	ESTUDIO HIDROLÓGICO Y POBLACIONAL.....	225
ANEXO 7	CORRIDAS DEL MODELO (VIDEO)	225

1 Introducción

En la historia, el primer modelo matemático de calidad de agua es el modelo desarrollado por Streeter y Phelps en 1925, desarrollado para 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, propuesta por el mismo Phelps, en la actualidad se sigue aplicando.

Los 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 a la descarga de un contaminante, a cambios en el uso de la tierra o a los efectos de cambios en el clima.

Como lo menciona Jorge Castillo, “hoy en día, existen numerosos 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”. De esta forma se precisa que mediante el uso de software especializado se pueden ensamblar modelos de calidad de agua para cuerpos de agua y soportados en los resultados de corridas del modelo para diferentes condiciones de caudales circulantes en él y diversas condiciones de aportes de cargas contaminantes sobre su cauce, tomar decisiones que contribuyan a preservar el recurso hídrico y garantizar el equilibrio en los ecosistemas acuáticos.

Para el desarrollo del presente trabajo, se seleccionó como área de estudio para la modelación de calidad de agua con la ayuda del programa IBER un tramo del río Lindo,

que se localiza en el departamento de Cundinamarca, en inmediaciones del casco urbano del municipio de Viotá, desarrollo urbano que se encuentra a unos 86 km al sur occidente de Bogotá D.C., en la provincia de Tequendama.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar un análisis de la calidad del agua en el río Lindo, mediante la construcción de un modelo matemático haciendo uso del programa IBER, aplicado a los parámetros:

- a. Demanda biológica de oxígeno carbonácea (DBOC) – mgDBO/L
- b. Oxígeno disuelto (OD) – mgOD/L

1.1.2 Objetivos específicos

1. Obtener información topo-batimétrica del río Lindo desde 500 metros aguas arriba del municipio Viotá hasta aproximadamente hasta la desembocadura con el río Calandaima.
2. Realizar trabajos de campo para la toma de muestras de agua del cuerpo del río y de los diferentes puntos de descarga de agua residual, provenientes del sistema de alcantarillado del casco urbano. Aforo en secciones estratégicas del río y de las descargas de A.R. y realizar ensayo de trazadores en el tramo del río Lindo seleccionado para el estudio.
3. Determinar mediante ensayos de laboratorio el OD y DBOC a las muestras tomadas en el río Lindo
4. Construir el modelo hidráulico y de calidad del agua, para el tramo del río Lindo seleccionado, en el programa IBER.
5. Calibrar el modelo matemático que representa el comportamiento hidráulico y de evolución de los parámetros de OD y DBOC, tomando como base las condiciones hidráulicas y los parámetros de calidad obtenidos en la campaña de medición.

6. Determinar, mediante análisis hidrológico, el caudal mínimo semanal para un periodo de retorno de 10 años (7Q10).
7. Realizar la evaluación de la calidad del agua del tramo en estudio para cuatro escenarios. El primero, simulando condiciones actuales con las descargas de A.R. actuales; el segundo, condiciones de estiaje, con las descargas de A.R. actuales y el caudal 7Q10; el tercero, condiciones de estiaje, con las descargas de A.R. aumentadas de acuerdo con la tasa de crecimiento poblacional (25 años) y la cuarta, descarga del efluente de la PTAR proyectada para tratar las A.R. de Viotá a un horizonte de 25 años, cumpliendo con los parámetros de calidad establecidos en la normas vigentes.
8. Comparar los resultados obtenidos de cada una de las modelaciones en términos de calidad del agua (Normatividad vigente) y los resultados obtenidos por otro trabajo de grado que implementará el programa HEC-RAS como programa de modelamiento, para el mismo caso.

2 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, debido a la introducción directa o indirectamente de sustancias, provenientes de sus actividades vitales y económicas, que luego resulta 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 consumo humano y para la industria. En estos apartados se presentan algunos conceptos básicos sobre la contaminación del agua y sobre los procesos físicos, químicos y biológicos que tiene lugar en el seno del flujo que determinan la evolución espacio temporal de los parámetros seleccionados para el análisis de este trabajo de grado.

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, domésticas, 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.

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

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.

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 solidos 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 de transporte son cambios que se producen en un sistema para restaurar el equilibrio cuando en partes del sistema se dan condiciones físicas diferentes.

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.

Con el fin de analizar el comportamiento de los contaminantes, los investigadores han propuesto diferentes expresiones empíricas para poder explicar la concentración que se ve afectada 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.

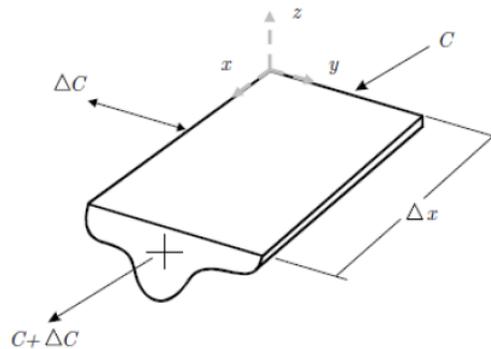


Figura 2-1. Proceso de advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.

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.

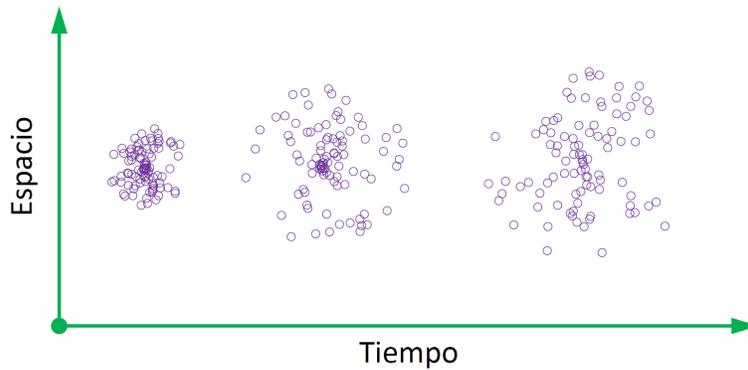


Figura 2-2. Fenómeno de difusión advección. Fuente: Propia.

2.2.3 Dispersión

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.

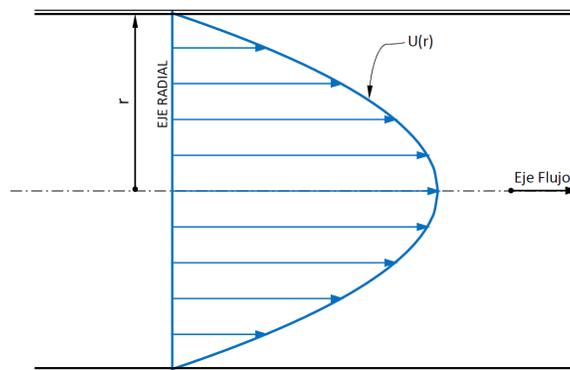


Figura 2-3. Fenómeno de difusión dentro de una sección de tubería advección. Fuente: Sierra Ramírez, Carlos Alberto. 2011. Calidad del agua evaluación y diagnóstico. Medellín, 2011.

2.3 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).

2.3.1 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 permiten 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.

2.3.2 Tipos de estudios⁴

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

2.3.2.1 Estudios descriptivos

Por estudios descriptivos se entiende la definición de un problema y no su solución para lo cual, en situaciones de calidad de agua pertenecen a esta categoría:

1. 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.
2. 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.
3. 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

⁴ 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.

diarias máximas de contaminación (TMDI, siglas en ingles), que por ley deben calcular las autoridades ambientales de los Estados Unidos para cada río, es utilizando un modelo de calidad del agua.

4. 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.

2.3.2.2 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:

1. Analizar la variación diaria de un contaminante. Está demostrado que 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 de tal manera que en la noche, durante la respiración, se presentan condiciones anaeróbicas que pueden ocasionar la muerte de peces.
2. Determinar el efecto de la construcción de un sistema de recolección de aguas residuales.

2.3.2.3 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:

1. 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.

2. 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.

2.4 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 se encuentran dentro de la normatividad vigente y es de los más comúnmente usados para los procesos de calibración en modelos de calidad en ríos, aunque se pueden establecer otros parámetros, dada la necesidad de disponer de recursos para la determinación de otros parámetros, se dio el apoyo institucional de parte de la ECI de implementar equipos específicos para la obtención de oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno.

2.4.1 Oxígeno disuelto (OD)⁵

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.

⁵ Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Es tal la importancia del oxígeno disuelto en ingeniería ambiental que es uno de los parámetros más importantes y estudiados, que determinan la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular. La determinación del oxígeno disuelto sirve como base para cuantificar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), aerobicidad de los procesos de tratamiento, tasas de aireación en los procesos de tratamiento aeróbico y grado de polución de los ríos. El oxígeno disuelto se presenta en cantidades variables y tasas 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. El oxígeno libre en solución, especialmente cuando está acompañado de dióxido de carbono (CO_2), es un agente de corrosión importante del hierro y el acero.

Las fuentes más importantes de OD son:

1. Reaireación de la atmosfera
2. Fotosíntesis de las plantas acuáticas
3. OD aportado por los tributarios

Los consumidores más importantes de OD son:

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

2.4.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)⁶

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

⁶ Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

demandas de oxígeno, ejercida por los microorganismos heterotróficos, que hay que cuantificar. En la siguiente ecuación se puede apreciar el cambio de energético por nuevo material:

Materia orgánica + O₂ + nutrientes → CO₂ + H₂O + nuevas células + nutrientes + energía

Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas residuales es el ensayo de DBO₅ a cinco días. La demanda bioquímica de oxígeno se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación aerobia (Ramalho, 2003). El ensayo se realiza bajo condiciones aeróbicas, durante un periodo de cinco días y a una temperatura estándar de 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 oxígeno disuelto para ser utilizado por los organismos.

2.4.3 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.

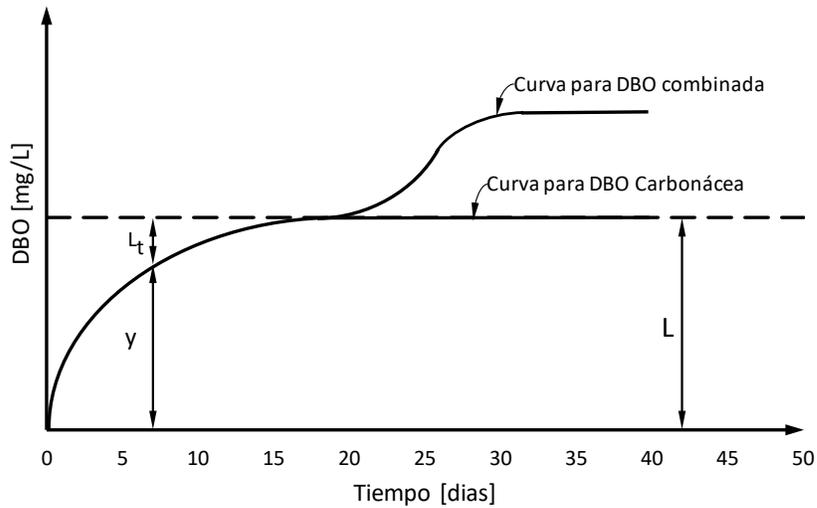


Figura 2-4. Curva de Demanda bioquímica de oxígeno. Fuente: Romero Jairo.

2.4.4 Comportamiento del OD y la DBO en un cuerpo de agua⁷

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.

⁷ Sierra, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín. Ediciones de la U.

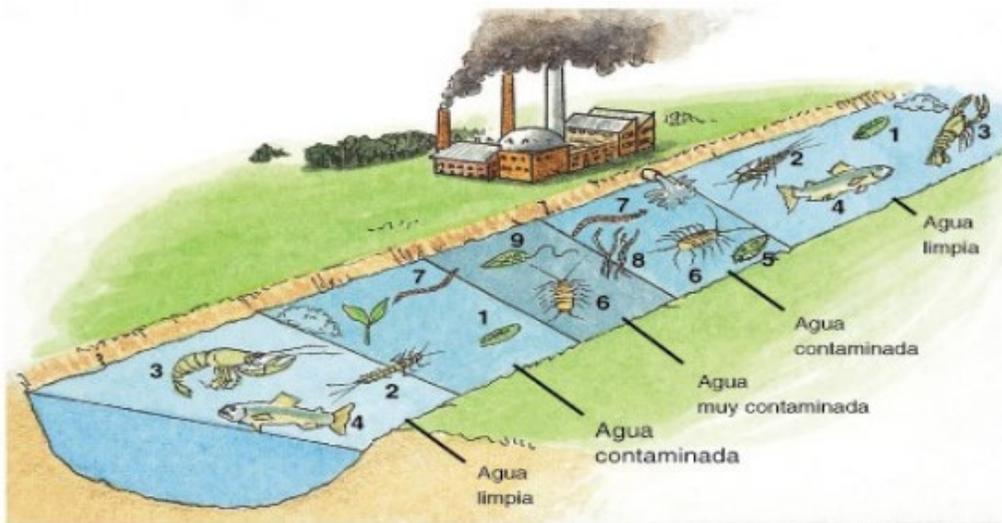


Figura 2-5. Fenómeno de autodepuración. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos

Se pueden establecer cuatro zonas de influencia de un vertido:

Zona de degradación

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

Zona séptica o de descomposición activa

1. Niveles mínimos de OD (puede llegar a desaparecer)
2. No viven peces, y los organismos encargados de la descomposición orgánica trabajan activamente

3. Pueden desprenderse gases (metano, hidrogeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros de mal olor)
4. Pueden aparecer espumas en la superficie

Zona de recuperación

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

Zona de agua limpia

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

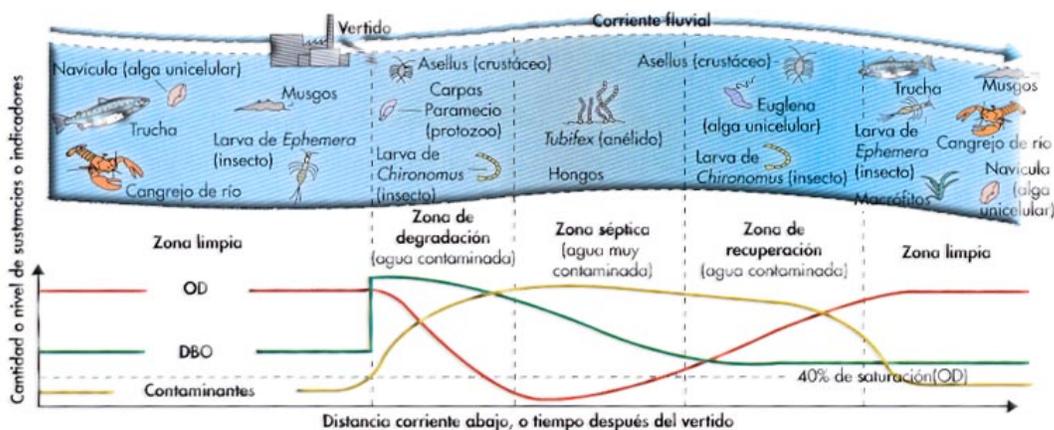


Figura 2-6. Zonas de influencia de un vertido. Fuente: Sánchez, D. Calidad del agua en ríos

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 2-6

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 2-6 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:

1. Reaeración: $k_a (C_s - C)$

2. Desoxigenación o degradación de la materia orgánica: $k_d * L$
3. Sedimentación: $k_s * L$

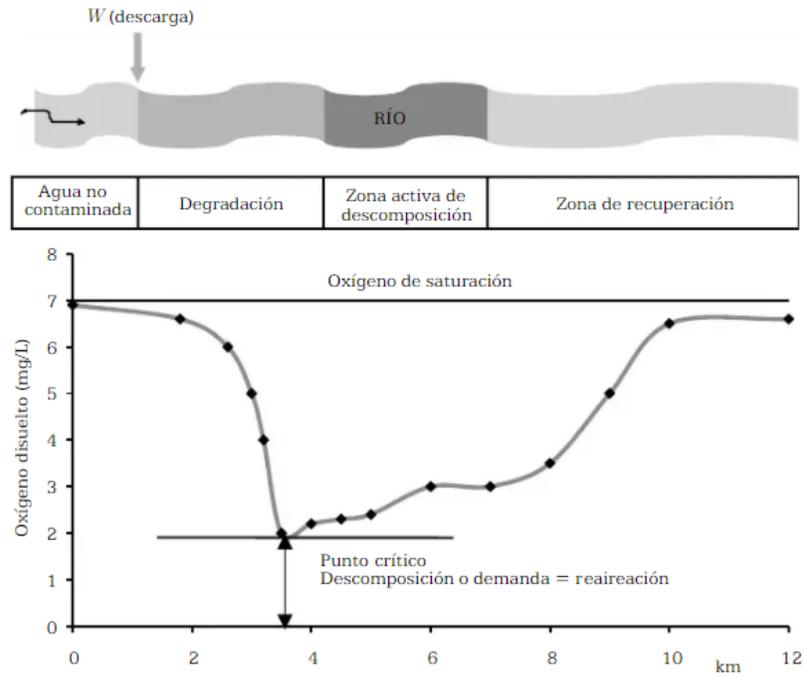


Figura 2-7. Comportamiento del oxígeno disuelto en una corriente de agua. Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico

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:

C representa la concentración de OD y la DBO en la corriente.

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:

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

La ecuación anterior expresa la variación de la DBO ultima L_x , con respecto a la distancia aguas abajo (x), donde la DBO ultima es L_o , 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:

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

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:

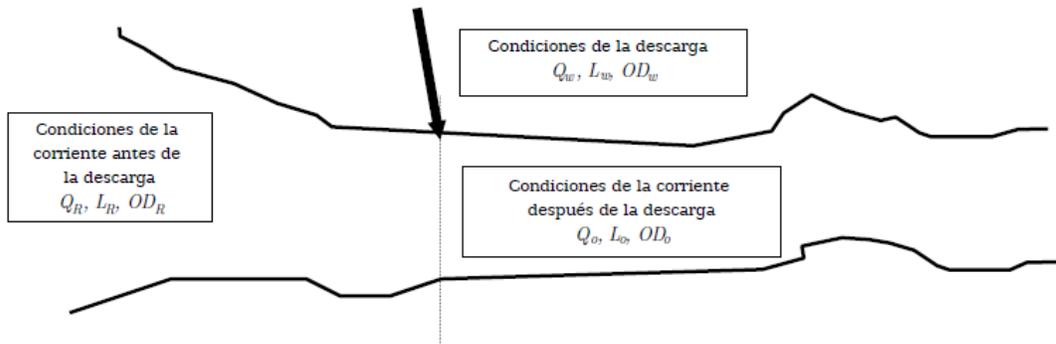


Figura 2-8. Esquema de una corriente de agua con las características de una descarga.
Fuente: Sierra, C. (2011). Calidad del agua, Evaluación y diagnóstico

$$Q_o = Q_R + Q_w$$

$$D_o = C_s - OD_o$$

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

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

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:

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

$D(x) = D_o e^{-k_a \frac{x}{v}}$	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

Para los anteriores procesos, se debe conocer el respectivo parámetro de concentración o de tasas para determinar la respuesta del modelo, para ello se realizan los respectivos ensayos o tomas en campo, o se recurre a la literatura para establecer los rangos de aplicación de estos parámetros.

2.5 Descripción del modelo computacional IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de

Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua.

El modelo maneja básicamente los siguientes módulos de cálculo.

1. Módulo hidrodinámico: Se considera la base del software, donde son resueltas las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant 2D.
2. Módulo de turbulencia: Permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, para lo cual se pueden utilizar diferentes modelos de turbulencia para aguas según el grado de complejidad.
3. Módulo de transporte de sedimentos: Resuelve ecuaciones de transporte (fondo y turbulento en suspensión), calculado a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.
4. Módulo de calidad del agua: calcula la evolución espacial y temporal de varias especies, incluyendo (Oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno carbonácea, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos/nitratos nitrógeno, temperatura y salinidad). Se resuelve una ecuación de transporte promediada en profundidad 2D para cada especie, incluidas las transformaciones bioquímicas para modelar su interacción mutua.
5. Módulo de procesos hidrológicos: IBER incluye algunas características que permiten el cálculo de la transformación de la escorrentía de la lluvia y, por lo tanto, hacen posible utilizar IBER como un modelo hidrológico distribuido basado en las ecuaciones 2D de aguas poco profundas.
6. Módulo de hábitat: Esta herramienta puede ser útil para la toma de decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos, en general, y para mejorar el estado actual de los ríos, en particular, con el objetivo de promover estrategias que promuevan la conservación del medio ambiente en los ríos, mejorando todos los aspectos ecológicos y biológicos

2.5.1 Programa IBER

Las características actuales de IBER son:

1. Módulo hidrodinámico basado en las ecuaciones 2D de Saint Venant
2. Esquemas explícitos de volumen finito en mallas no estructuradas
3. Capacidad para resolver flujos subcríticos y supercríticos, incluidos saltos hidráulicos inestables
4. Varios modelos de turbulencia promediada en profundidad 2D
5. Estructuras internas: puentes, puertas, vertederos y alcantarillas.
6. Modelado de presas
7. Evaluación de inundación y riesgo de inundación
8. Procesos de lluvia e infiltración
9. Tensión superficial del viento
10. Evolución del lecho debido al transporte de sedimentos considerando tanto el lecho como las cargas suspendidas
11. Idoneidad del hábitat de los peces para las evaluaciones del área utilizable ponderada (WUA)
12. Integración SIG
13. Verificado y validado con soluciones analíticas, otros modelos, pruebas de laboratorio y mediciones de campo.
14. IBERPLUS, una implementación paralela del modelo IBER que utiliza la computación GPU a través de NVIDIA CUDA para lograr aceleraciones hasta 100 veces más rápidas.

2.5.2 Esquemas numéricos

Las ecuaciones hidrodinámicas, así como los modelos de turbulencia y el modelo de transporte de sedimentos, se resuelven con un solucionador de volumen finito no estructurado.

Las características de los esquemas numéricos utilizados en IBER son los siguientes:

1. Esquemas conservadores de volumen finito
2. Capacidad para resolver flujos subcríticos y supercríticos y cambios en el régimen de flujo
3. Mallas no estructuradas formadas por elementos con 3 o 4 caras.
4. Tratamiento conservador de frentes secos y húmedos.
5. Esquema explícito en el tiempo

2.5.3 Modelo de cálculo hidrodinámico

Como se mencionó, el módulo hidrodinámico basado en las ecuaciones 2D de Saint Venant se resuelven a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y las ecuaciones de conservación momento en las dos direcciones horizontales, es decir, no se incluyen las relaciones con la otra dimensión espacial, la profundidad, por lo tanto el motor geométrico de modelado está basado en mallas bidimensionales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

en donde h es el calado, U_x, U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es

la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e y τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Se incluyen los siguientes términos en las ecuaciones hidrodinámicas:

1. Presión hidrostática
2. Pendiente del fondo
3. Tensiones tangenciales viscosas y turbulentas
4. Rozamiento del fondo
5. Rozamiento superficial por viento
6. Precipitación
7. Infiltración

Se modelan asimismo los frentes seco-mojado, tanto estacionarios como no estacionarios, que puedan aparecer en el dominio. Dichos frentes son fundamentales en la modelización de zonas inundables en ríos, así como en estuarios. De esta forma se introduce la posibilidad de evaluar la extensión de zonas inundables en ríos, así como el movimiento del frente de marea en estuarios y zonas costeras.

Para la presión hidrostática corresponden a las ecuaciones:

$$g \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad \wedge \quad g \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

En donde tiene en cuenta la variación de la densidad en las dimensiones horizontales.

Para la pendiente del fondo se tiene en cuenta las variaciones tanto en x como en y, dado que el mallado permite determinar los cambios del fondo en ambas direcciones.

Para las tensiones efectivas horizontales que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas incluyen los efectos de las tensiones viscosas, de las tensiones turbulentas y los términos de dispersión debido a la no homogeneidad en profundidad del perfil de velocidad.

$$\tau_{ij}^e = \tau_{ij}^v - \overline{u'_i u'_j} + D_{ij}$$

Donde:

τ_{ij}^v = Tensiones Viscosas = $\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ (Viscosidad cinemática, es apreciable en paredes y en flujo laminar)

$\overline{u'_i u'_j}$ = Tensiones Turbulentas (Reynolds) = $-\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$, la formulación de Boussinesq es la tomada para el modelo de la turbulencia, por lo general tienen mayor relevancia que las tensiones viscosas.

D_{ij} = Dispersión lateral: $D_{ij} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} (U_i - \bar{u}_i)(U_j - \bar{u}_j) dz$, aplican principalmente cuando hay radios de giro o confluencias.

Para la fricción de fondo tiene en cuenta dos efectos que se producen en su presencia, la resistencia producida que contrarresta la velocidad media y la turbulencia, en el modelo se presenta como una velocidad de fricción U_f :

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

Donde:

τ_b = Módulo de fuerza de fricción, debido a que el modelado es mallas no es posible determinar la fricción sobre paredes verticales, por lo tanto el programa relaciona la U_f con la velocidad media promediada o ponderada por la profundidad, mediante un coeficiente de fricción:

$$\tau_b = \rho u_f^2 = \rho C_f |U|^2$$

El coeficiente de fricción se aproxima al coeficiente de un canal con flujo uniforme con un perfil logarítmico de velocidad en la profundidad.

Debido al modelo geométrico de mallado, el concepto de radio hidráulico en una sección no es aplicable, por lo tanto para efectos de aplicabilidad del concepto de radio hidráulico se asume igual a la profundidad hidráulica o calado sin importar en qué dirección horizontal se aplique:

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h\Delta x}{\Delta x}$$

Con lo anterior el C_f se evalúa con la ecuación de Manning, teniendo en cuenta que el coeficiente de Manning es el parámetro principal:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

Para los efectos producidos por el viento sobre la superficie del agua, el programa asume las condiciones de velocidad del viento a 10 m de altura sobre la superficie y un coeficiente de arrastre y aplicando la ecuación de Van Dor (1953):

$$\tau_s = \rho C_{vd} V_{10m}^2$$

Por defecto, el programa toma un coeficiente $C_{vd} = 2.5 \times 10^{-6}$

2.5.4 Condiciones de contorno hidrodinámicas

Se definen dos tipos de contornos los abiertos y los cerrados, para lo cual, los cerrados a se denominan tipo pared, cuya principal característica es que son impermeables, es decir no permiten el paso de flujo a través de ellos.

Para los contornos cerrados, hay dos condiciones de definición por el programa, uno de deslizamiento libre y el otro de deslizamiento restringido, el primero no hay resistencia de tensión tangencial y el segundo la hay, de tal forma que se denomina condición de fricción de pared y tiene presente los efectos de fricción en los cálculos. Una condición de

despreciar los efectos de las paredes es cuando la relación de superficie de las paredes y las del fondo es muy pequeña, condición que se da para canales muy anchos, los estuarios y en general cuando la relación $b \gg h$, siendo b la base o ancho del fondo y h la altura de las paredes.

Para la otra condición de que se tienen en cuenta los efectos de rozamiento de las paredes, y que estos efectos condiciones se dan para cuando la relación b/h es menor a 100, aunque son pequeños, igual pueden influir en el flujo se determinan dos condiciones de estos efectos, de tipo turbulento liso y de tipo turbulento rugoso, condicionado por la rugosidad de la pared y de la velocidad del flujo cerca de las paredes, definida como U_* .

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

Y la velocidad tangencial derivada por los efectos viscosos del fluido y de la rugosidad de la pared se toma como:

$$|u| = \frac{u_*}{k} \ln(E \cdot y^{\leftarrow})$$

$$y^{\leftarrow} = \frac{y}{\nu} u_*$$

Donde y es la distancia perpendicular a la pared y E un parámetro dependiente de la rugosidad y del tipo de flujo:

Tabla 2-1 Fricción en la pared

Tipo de Régimen	$K_s^{\leftarrow} = \frac{K_s}{\nu} u_*$	$ u = \frac{u_*}{k} \ln(E \cdot y^{\leftarrow})$
Liso	$K_s^{\leftarrow} < 5$	$E = 9.0$
Liso - Rugoso	$5 < K_s^{\leftarrow} < 70$	$E = \frac{30}{K_s^{\leftarrow}}$
Rugoso	$K_s^{\leftarrow} > 70$	$E = \frac{1}{0.11 + 0.033 K_s^{\leftarrow}}$

Fuente: Manual programa IBER

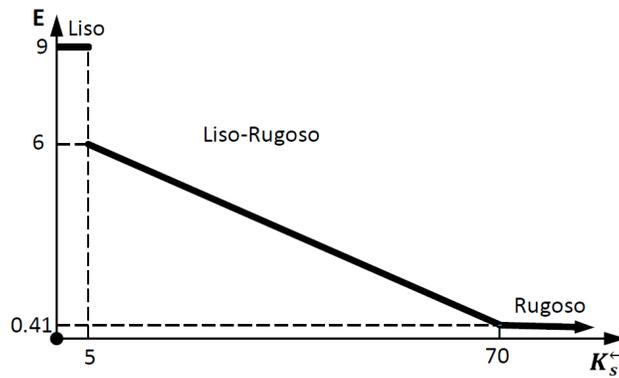


Figura 2-9. Fricción de Pared. Programa IBER

Para los contornos abiertos, se definen como aquellos que corresponde a entradas o salidas dentro del sistema, y dependiendo del tipo se deben imponer diferentes condiciones a saber, desde el punto de vista del tipo de régimen (cota de elevación de la superficie del agua) y/o desde el punto de vista del gasto de entrada o salida.

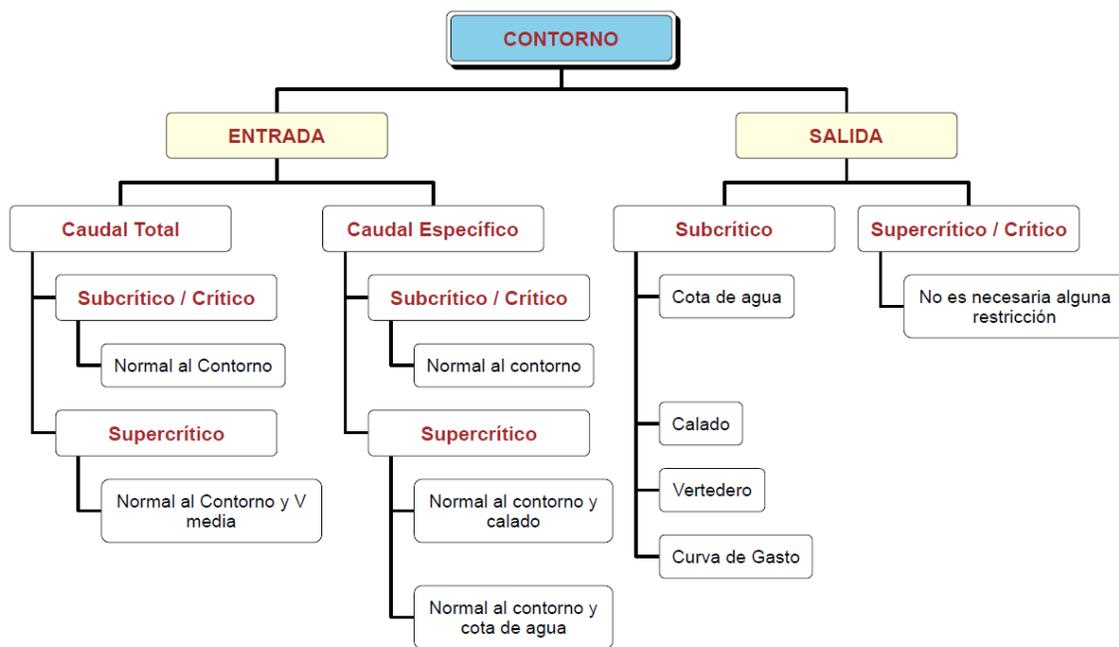


Figura 2-10 Condiciones de Contorno Entrada y Salida

Para las condiciones de contorno internas se aplican para modelar estructuras tipo compuertas, vertederos, puentes, compuertas, entre otras, de las cuales se tiene:

1. Flujo bajo compuerta
2. Flujo sobre vertedero con lámina libre
3. Combinación de compuerta y vertedero
4. Pérdida localizada

2.5.5 Capacidad de modelación de calidad de agua

El módulo de calidad de agua utilizado por IBER corresponde a los siguientes parámetros o componentes:

1. Temperatura
2. Salinidad
3. Oxígeno disuelto
4. Materia orgánica carbonosa
5. Nitrógeno orgánico
6. Nitrógeno amoniacal
7. Nitritos y nitratos
8. Escherichia Coli (E. Coli)

En la Figura 2-11 se presenta el modelo completo de calidad de agua en IBER, las líneas discontinuas indican la dependencia de un proceso en una variable

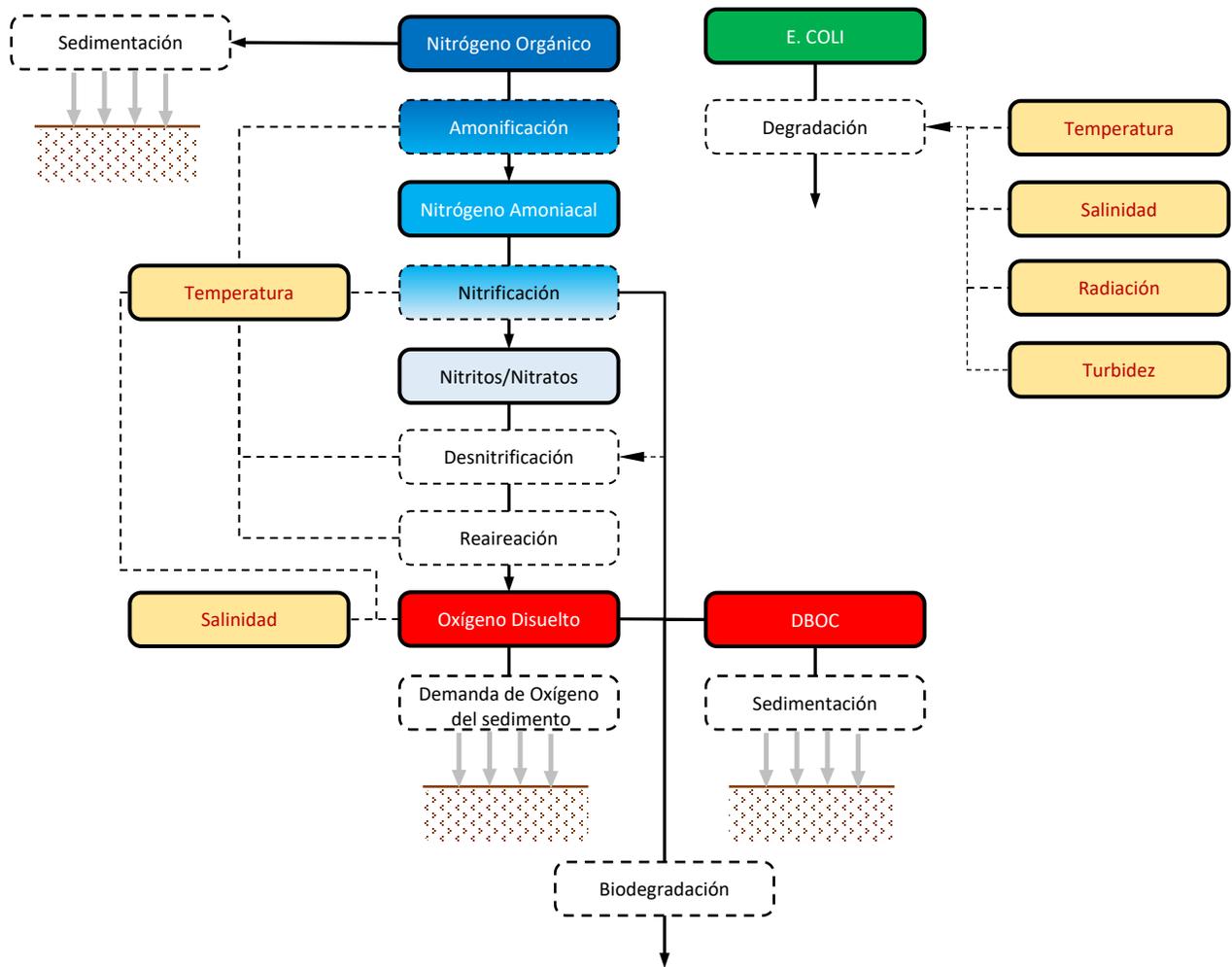


Figura 2-11 Esquema del modelo de calidad de agua en IBER

2.5.6 Modelo de transporte

Para cada uno de los componentes presentados se resuelve por medio de volúmenes finitos una ecuación de conservación de masas en 2D (Mallas) promediada o ponderada con la profundidad y que corresponde a:

$$\frac{\partial}{\partial t}(h C) + \frac{\partial}{\partial x}(h U_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(h U_y C) = \frac{\partial F_{d,x}}{\partial x} + \frac{\partial F_{d,y}}{\partial x} + S_c h$$

Donde:

C = Concentración de la variable considerada y promediada o ponderada con la profundidad.

h = Es el calado (Profundidad).

U_x, U_y = Componentes respectivos de velocidad y promediadas o ponderadas con la profundidad.

S_c = Terminio que representa una fuente o sumidero que modela la generación o degradación de la sustancia considerada.

$F_{d,x}, F_{d,y}$ = Flujos difusivos o dispersivos que modelan la mezcla debido a efectos como la difusión laminar, turbulencia o dispersión por oleaje.

La difusión turbulenta es considerada de forma isotrópica y proporcional al coeficiente de viscosidad turbulenta calculado en el estado hidrodinámico, mientras que para el oleaje será anisótropo y en dirección del oleaje, IBER incorpora la formulación de Law (2000) para el cálculo de los coeficientes del oleaje correspondiente al de dispersión longitudinal.

Los correspondientes flujos difusivos o dispersos se calculan mediante las siguientes ecuaciones

$$F_{d,x} = h \left(\Gamma_m + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right) \frac{\partial C}{\partial x} + h D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + h D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y}$$

$$F_{d,y} = h \left(\Gamma_m + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right) \frac{\partial C}{\partial y} + h D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + h D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y}$$

$$D_{xx} = D_l \cos^2 \alpha \quad D_{xy} = D_{yx} = D_l \cos \alpha \sin \alpha \quad D_{yy} = D_l \sin^2 \alpha$$

Donde:

Γ_m = Coeficiente de difusión molecular para la variable considerada

v_t = Viscosidad turbulenta

$S_{c,t}$ =Número de Schmidt turbulento, que relaciona el coeficiente de difusión turbulenta de momento y el coeficiente de difusión turbulenta de la variable considerada.

D_l =Coeficiente longitudinal de dispersión por oleaje y α el ángulo de dirección con respecto al eje x de propagación del oleaje.

2.5.7 Términos fuente

Las interacciones entre las distintas sustancias consideradas en el modelo mediante fenómenos físicos, químicos y biológicos se modelan mediante el término S_c , mediante transformaciones de primer orden:

$$S_c = k(T)C ,$$

$$k(T) = k(20)\theta^{T-20}$$

Donde:

C = es la concentración de la variable considerada

$k(20)$ = Constante cinética de reacción a 20°C

T = Temperatura del agua en °C

θ = Coeficiente de corrección de temperatura

Para el caso específico de modelar salinidad, el término $S_c = 0$, en la ecuación del modelo de transporte, debido a que la sal es una sustancia conservativa que no reacciona con otras sustancias.

2.5.8 Modelo de Temperatura

IBER considera el modelo de temperatura como el flujo neto de calor entre las distintas fuentes (Solar principalmente), dado que la temperatura está presente en todos y cada uno de los procesos que involucra el modelo de calidad en las reacciones químicas que se presentan en cada uno de los componentes modelados.

La ecuación que representa el modelo de temperatura corresponde a:

$$S_T = \frac{Q}{\rho C_{pw}}$$

Donde:

C_{pw} = Coeficiente térmico del agua

Q = Flujo neto de calor entre el aire y la superficie del agua

El flujo neto se compone de lo proveniente de la radiación solar, por evaporación y por conducción, teniendo en cuenta que la de conducción puede ser en ambos sentidos:

$$Q = Q_{rad} - Q_{br} - Q_{cond} - Q_{evap}$$

Q_{rad} = Radiación neta en W/m^2 , para la radiación solar en onda corta (Alta energía) y la radiación atmosférica en onda larga (baja energía). Es dada por el usuario

Q_{br} = Radiación de onda larga emitida por el agua. Se utiliza la ecuación de Stefan - Boltzman

Q_{cond} = Radiación transferida entre el aire y el agua, se utiliza el coeficiente de Bowen y una función de transferencia del viento de Brady et. al. (1969)

Q_{evap} = Radiación transferida de energía por evaporación o condensación del agua, mediante la ley de Dalton y las presiones de vapor con Raudkivi (1979).

2.5.9 **Materia orgánica carbonosa**

A partir de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonosa (DBOC), que representa la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica carbonosa presente en el agua, IBER utiliza un término fuente de DBOC para los procesos de degradación de la materia orgánica carbonosa y sedimentación de la materia orgánica carbonosa y se describe como:

$$S_{DBOC} = -K_{DBOC}\theta_2^{(T-20)} F_{oxc} DBOC - \frac{V_{sDBOC}}{h} DBOC$$

Donde:

K_{DBOC} = Constante de degradación de materia orgánica carbonosa a dar por el usuario, se pueden tomar referencias de Bowie et. al. (1985)

$\theta_2^{(T-20)}$ = Coeficiente de corrección por temperatura=1.047, con T en °C

F_{oxc} = Factor de atenuación por bajos niveles de oxígeno = $\frac{OD}{K_{socf} + OD}$, IBER toma $K_{socf} = 0.5 \text{ mg/L}$, OD = Oxígeno Disponible

V_{sDBOC} = Velocidad de sedimentación, a introducir por el usuario, por lo general entre 0.01 m/d y 0.36 m/d, h = Calado o profundidad.

2.5.10 Nitrógeno orgánico

IBER considera una término fuente de conservación de masa del nitrógeno orgánico como:

$$S_{Norg} = -K_{hN}\theta_4^{(T-20)} N_{org} - \frac{V_{sN}}{h} N_{org}$$

Donde:

K_{hN} = Constante de hidrólisis del nitrógeno orgánico en amonio a 20°C

$\theta_4^{(T-20)}$ = Coeficiente de corrección por temperatura= 1.047, con T en °C

N_{org} = Concentración de nitrógeno orgánico,

V_{sN} = Velocidad de sedimentación, a introducir por el usuario, por lo general entre 0.001 m/d y 0.1 m/d, h = Calado o profundidad.

2.5.11 Nitrógeno amoniacal

IBER considera una término fuente de conservación de masa del amonio teniendo en cuenta que los procesos que afectan el nitrógeno amoniacal son el incremento por la hidrólisis del nitrógeno orgánico y la disminución de esta por nitrificación desde amonio a nitritos y de estos a nitratos.

$$S_{NH_4} = -K_{hN}\theta_4^{(T-20)} N_{org} - K_{nit}\theta_3^{(T-20)} F_n NH_4$$

Donde:

K_{nit} = Constante de nitrificación a 20°C

$\theta_3^{(T-20)}, \theta_4^{(T-20)}$ = Coeficientes de corrección por temperatura, $\theta_3 = 1.083, \theta_4 = 1.047$, con
T en °C

NH_4 = Concentración de nitrógeno en forma amoniacal,

F_N = Factor de atenuación por bajos niveles de oxígeno = $\frac{OD}{K_{n1/2} + OD}$, IBER toma $K_{n1/2} = 0.5 \text{ mg/L}$, O'Connor et. al. (1981), OD = Oxígeno Disponible

2.5.12 Nitratos

IBER considera una término fuente de conservación de masa del nitrato como:

$$S_{NO_3} = -K_{nit}\theta_3^{(T-20)} F_n NH_4 - K_{denit}\theta_5^{(T-20)} F_{dn} NO_3$$

Donde:

K_{denit} = Constante de desnitrificación a 20°C

$\theta_3^{(T-20)}, \theta_5^{(T-20)}$ = Coeficientes de corrección por temperatura, $\theta_3 = 1.083, \theta_5 = 1.045$, con
T en °C

NO_3 = Concentración de nitrógeno en forma de nitratos,

F_N = Factor de corrección para tener en cuenta la desnitrificación, solo se produce en momentos de anoxia $= \frac{K_{dn\ 1/2}}{K_{dn\ 1/2} + OD}$, IBER toma $K_{dn\ 1/2} = 0.1\ mg/L$, para concentraciones altas de OD, O'Connor et. al. (1981), OD = Oxígeno Disponible

2.5.13 Oxígeno disuelto

El principal elemento que permite el equilibrio en los ecosistemas acuáticos es la disponibilidad de oxígeno y es el que define que tan "saludable" puede estar la fuente de agua a estudiar, para efectos de su modelamiento, IBER considera varios procesos que permiten la entrada o salida de oxígeno: Reaireación superficial, consumo de oxígeno disuelto por degradación química de materia orgánica carbonosa, consumo de oxígeno por nitrificación y demanda de oxígeno por nitrificación, por lo tanto el término fuente de oxígeno es:

$$S_{OD} = -K_{aire}\theta_1^{(T-20)} (OD_{sat} - OD) - K_{dboc}\theta_2^{(T-20)} F_{oxc} DBOC - \frac{K_{dos}}{h} - r_a K_{nit}\theta_3^{(T-20)} F_n NH_4^+$$

Donde

OD = Concentración de oxígeno disuelto

OD_{sat} = Concentración de saturación del oxígeno disuelto, se utiliza la ecuación APHA 1995, que tiene en cuenta la temperatura del agua, la salinidad y la presión atmosférica, así mismo se corrige el efecto de la altitud con un factor de $(1 - 0.0001148Z)$, siendo Z la altitud.

K_{aire} = Constante de reaireación a 20°C, tiene en cuenta el calado o profundidad, la velocidad del fluido con el método de Covar (1976) y la velocidad del viento utilizando Bans y Herrera (1975, 1977)

K_{dboc} = Constante de degradación de materia orgánica carbonosa, ver 2.5.9

$F_{oxc} DBOC$ = Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno, ver 2.5.9

K_{dos} = Tasa de demanda de oxígeno del sedimento, de acuerdo con Thomann (1972), los valores medios pueden estar entre 4.0 a 0.07 gO₂/m²/d y dependen su

concentración del tipo de fondo por procedencia urbana o de tipo de estuario o del tipo del suelo, donde $DOS = \frac{K_{dos}}{h}$, siendo h el calado o profundidad

r_a = Tasa de consumo de oxígeno por oxidación del amonio en el proceso de nitrificación, que corresponde a 4.57 mgO/mgN, IBER toma el proceso total de amonio a nitritos y de nitritos a nitratos, resultando esa tasa.

K_{nit} = Constante de nitrificación a 20°C

F_n = Factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno

$\theta_1^{(T-20)}, \theta_2^{(T-20)}, \theta_3^{(T-20)}$ = Coeficientes de corrección por temperatura, $\theta_1 = 1.0238, \theta_2 = 1.047, \theta_3 = 1.083$, con T en °C

2.5.14 Eschirichia Coli

La bacteria Eschirichia Coli (E. Coli) es un contaminante que está presente en las aguas servidas, que por su importancia, se ha estudiado su ciclo en donde se ha identificado que para su desarrollo están presentes factores físico, ecológicos y biológicos y para su inactivación se han identificado factores naturales como la radiación solar, la salinidad o la temperatura, como los principales y que se pueden modelar. IBER utiliza un término fuente de E. Coli de reacción cinética de primer orden así:

$$S_c = K_{dc}C$$

Donde

K_{dc} = La tasa de desaparición del E. Coli, se utilizan modelos de Mancini (1978) o Canteras (1995) y el usuario tiene la posibilidad de introducir directamente el T_{90} , correspondiente a la disminución del 90% de la población bacteriana en un tiempo T, mediante la relación: $T_{90} = \frac{\ln 10}{K_{dc}}$

C = Concentración del E. Coli

2.5.15 Parámetros constantes en el modelo de calidad

IBER recomienda los rangos de uso de los diferentes parámetros que intervienen en el modelo de calidad de agua:

Tabla 2-2 Rango de valores para parámetros del modelo de calidad IBER

Parámetro	Proceso	Unidad	Mínimo	Máximo	θ
K_{nit}	Nitrificación	d ⁻¹	0.01	1	1.083
K_{hn}	Amonificación	d ⁻¹	0.02	0.4	1.047
K_{denit}	Desnitrificación	d ⁻¹	0.001	0.1	1.045
K_{dboc}	Degradación MOC	d ⁻¹	0.02	3.4	1.047
K_{aire}	Reaireación	d ⁻¹	Covar (1976)		1.024
V_{sDBOC}	Sedimentación MOC	m d ⁻¹	0.01	0.36	
K_{dos}	Demanda de OD sedimento	kg m ⁻² d ⁻¹	0.0	0.01	
V_{sN}	Sedimento N orgánico	m d ⁻¹	0.001	0.1	
K_{dec}	Desaparición bacteriana	d ⁻¹	Mancini (1995)	(1978)	/Canteras

Fuente: Manual Programa IBER

3 Marco legal

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

Tabla 3-1. 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 3-2 Relación de normatividad asociada a temas ambientales y de calidad del agua.

LEYES	DECRETOS	RESOLUCIONES
Ley No. 1625 de 2013	Decreto No. 2245 de 2017	Resolución No. 959 de 2018
Ley No. 373 de 1997	Decreto No. 1076 de 2015	Resolución No. 957 de 2018
Ley No. 161 de 1994	Decreto No. 1640 de 2012	Resolución No. 751 de 2018
Ley No. 99 de 1993	Decreto No. 2667 de 2012	Resolución No. 0631 de 2015
Ley No. 10 de 1978	Decreto No. 0303 de 2012	Resolución No. 1207 de 2014
Ley No. 23 de 1973	Decreto No. 4728 de 2010	Resolución No. 1907 de 2013
	Decreto No. 3930 de 2010	resolución No. 0509 de 2013
	Decreto No. 2372 de 2010	resolución No. 1514 de 2012
	Decreto No. 3200 de 2008	Resolución No. 955 de 2012
	Decreto No. 3600 de 2007	Resolución No. 0075 de 2011
	Decreto No. 1775 de 2007	Resolución No. 4716 de 2010
	Decreto No. 1575 de 2007	Resolución No. 1023 de 2010
	Decreto No. 1480 de 2007	Resolución No. 493 de 2010
	Decreto No. 1449 de 1977	Resolución No. 0941 de 2009
	Decreto No. 1324 de 2007	Resolución No. 2115 de 2007
	Decreto No. 1323 de 2007	Resolución No. 0974 de 2007
	Decreto No. 900 de 2006	Resolución NO. 0872 de 2006
	Decreto No. 4742 de 2005	Resolución No. 2145 de 2005
	Decreto No. 55 de 2004	Resolución No. 1433 de 2004
	Decreto No. 1443 de 2004	Resolución No. 240 de 2004
	Decreto No. 0321 de 1999	Resolución No. 104 de 2003
	Decreto No. 1311 de 1998	Resolución No. 0081 de 2001
	Decreto No. 3102 de 1997	Resolución No. 372 de 1998
	Decreto No. 1933 de 1994	
	Decreto No. 1600 de 1994	
	Decreto No. 2324 de 1984	
	Decreto No. 1594 de 1984	
	Decreto No. 1875 de 1979	
	Decreto No. 1541 de 1978	
	Decreto No. 2811 de 1974	

Fuente Minvivienda

4 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 aproximada de 93 km².

4.1 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 4-1, 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 4-1. 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

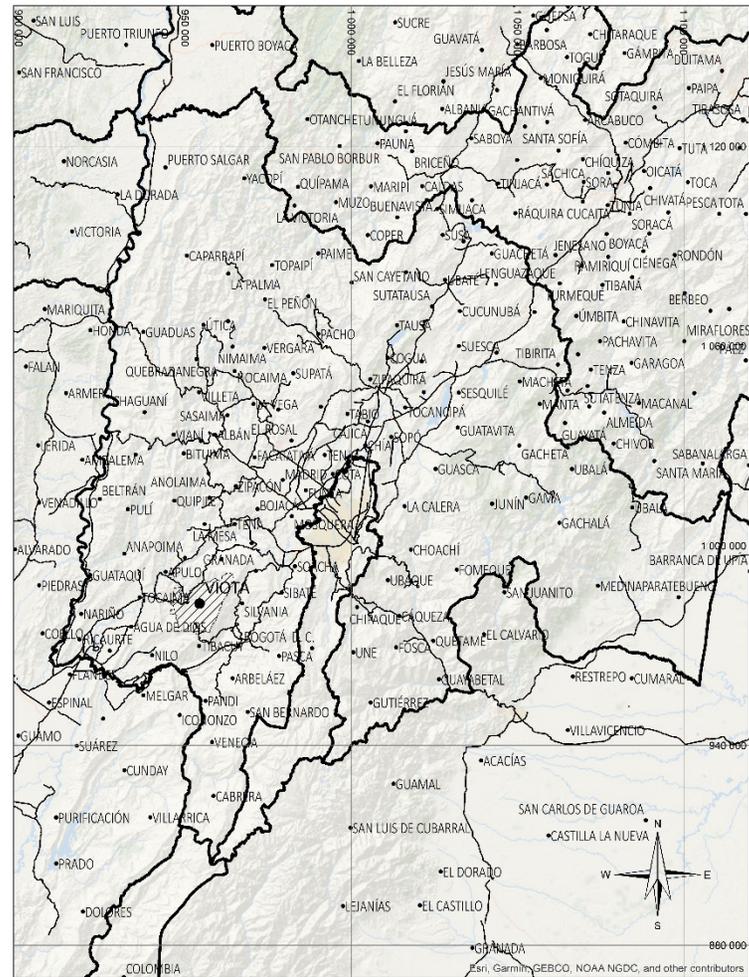


Figura 4-1 Localización del municipio de Viotá - Cundinamarca

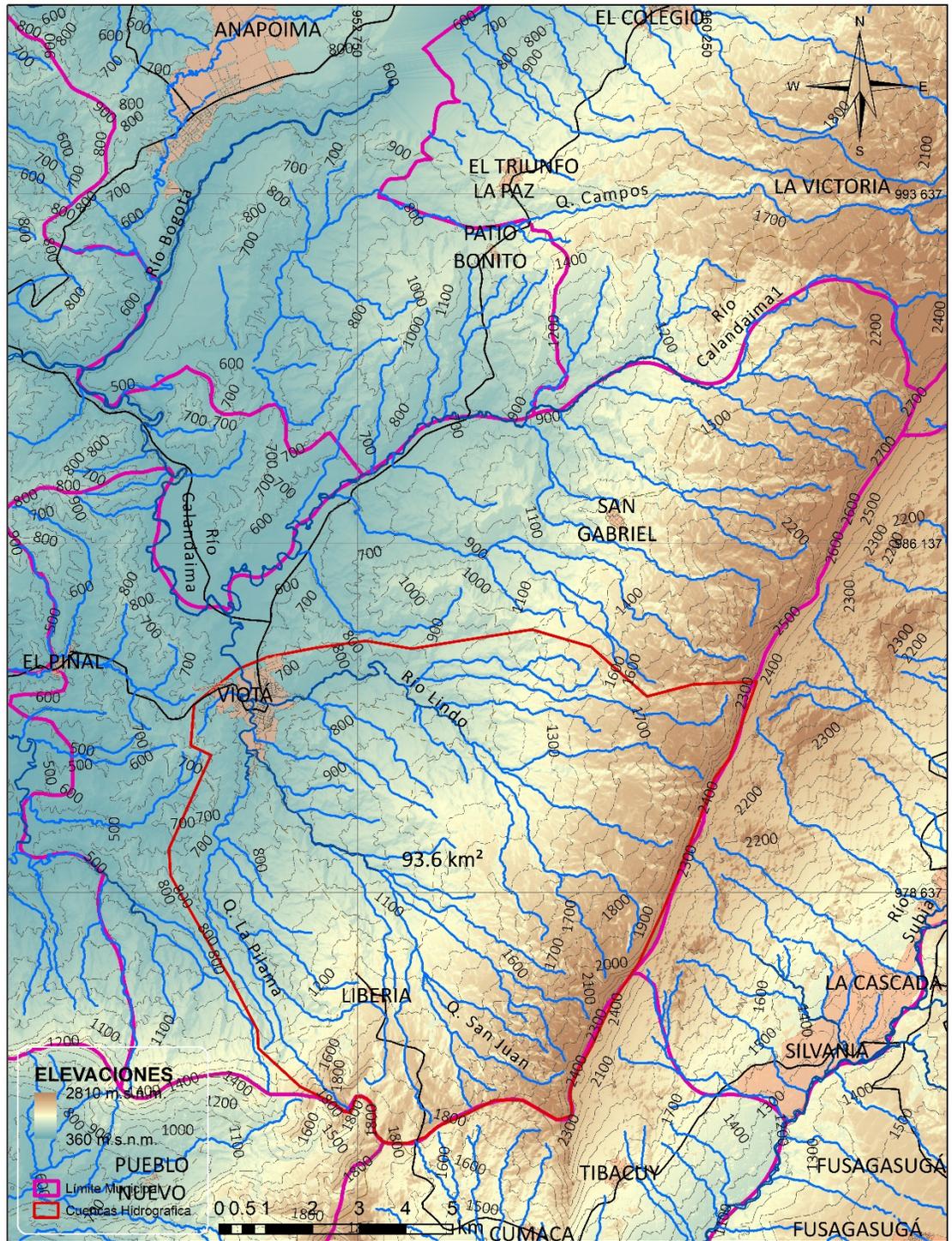


Figura 4-2. Localización general del área de estudio. Elaboración propia.

Con más detalle se puede observar en la Figura 4-3, 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.

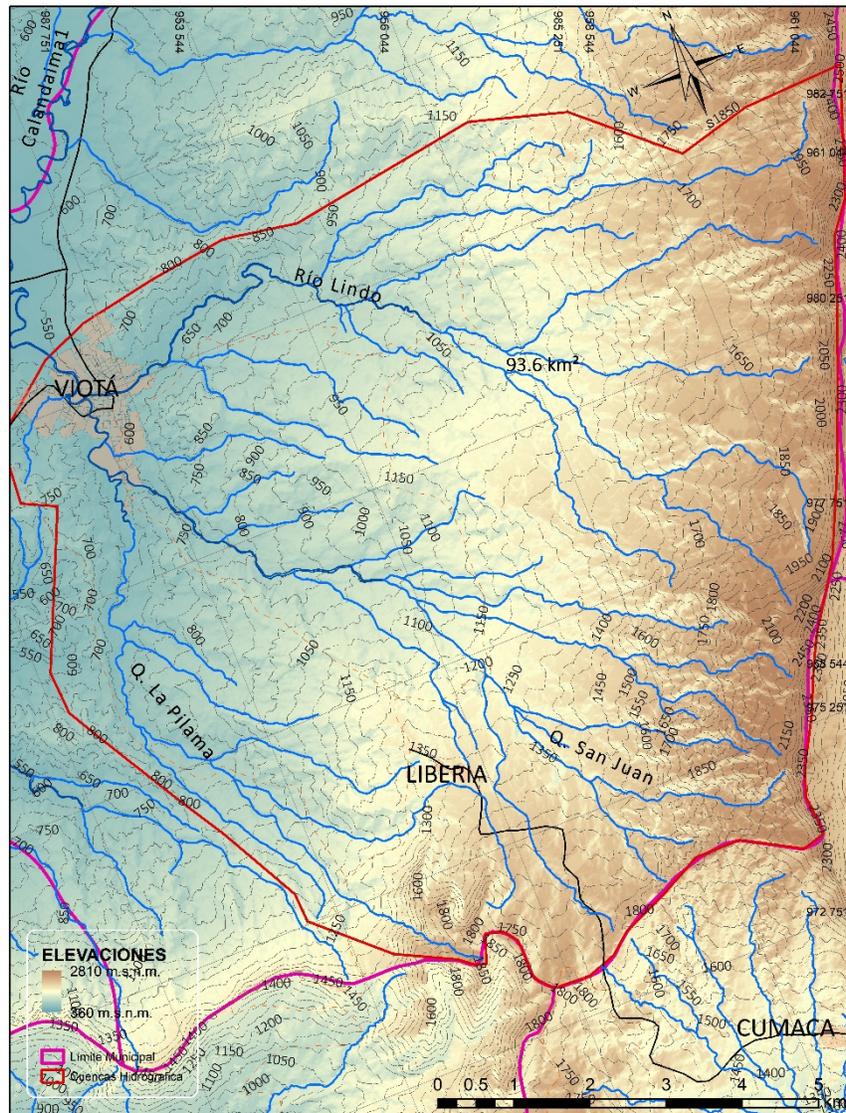


Figura 4-3. Localización detallada del río Lindo. Elaboración propia

4.2 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 hidrometeorológicas donde se muestra en la Tabla 4-2 el tipo de estación y sus características principales (nombre, tipo, código).

Tabla 4-2 Estaciones hidrometeorológicas 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: Hidrometeorológica
 PM: Pluviométrica
 LG: Linigráfica
 CO: Climatológica ordinaria
 CP: Climatológica principal

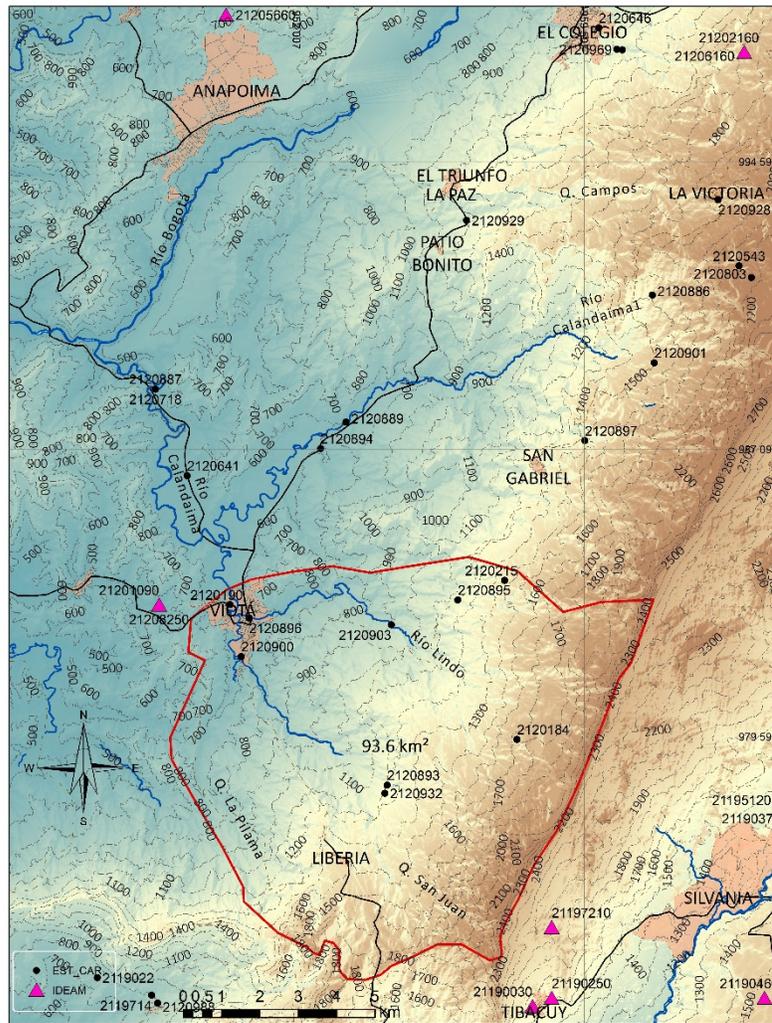


Figura 4-4. Mapa de estaciones Red CAR y Red IDEAM – municipio de Viotá.

fuelle IDEAM, CAR

4.2.1 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)

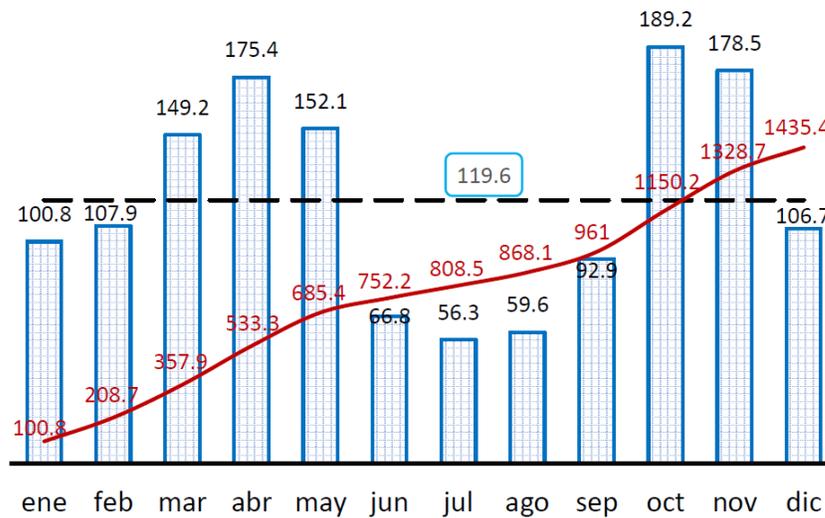


Figura 4-5. Precipitación media mensual multianual cuenca Río Lindo.

Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S.

4.2.2 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 22°C”. (Generalidades municipio de Viotá, junio de 2015)

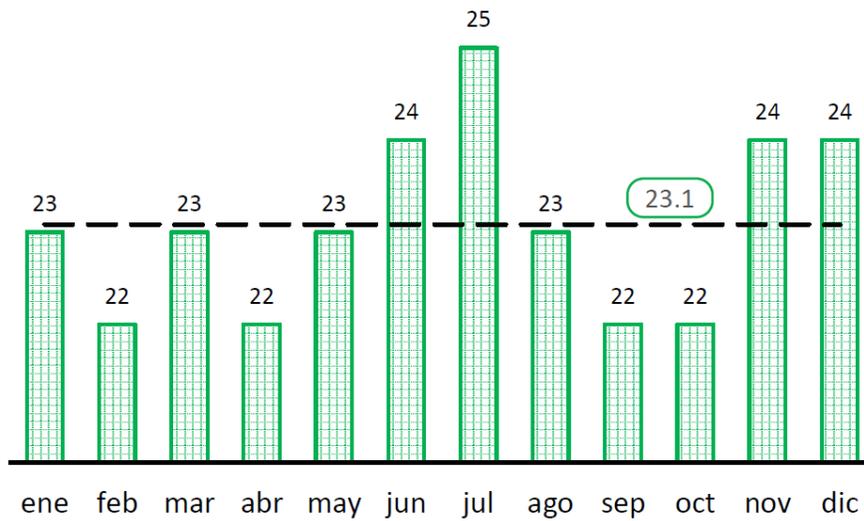


Figura 4-6. Histograma de temperatura media mensual multianual.

Fuente: UT AVR-CAR 2015, IDEAM (2013) e IGAC (2010)

4.2.3 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)

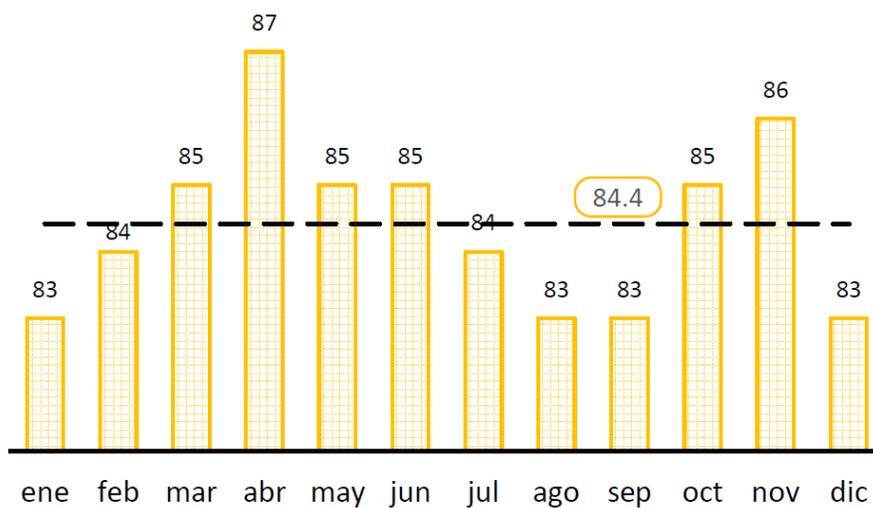


Figura 4-7. Histograma de humedad relativa media mensual multianual.

Fuente: UT AVR-CAR 2015, a partir de información del IDEAM (2013) e IGAC (2010)

4.2.4 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).

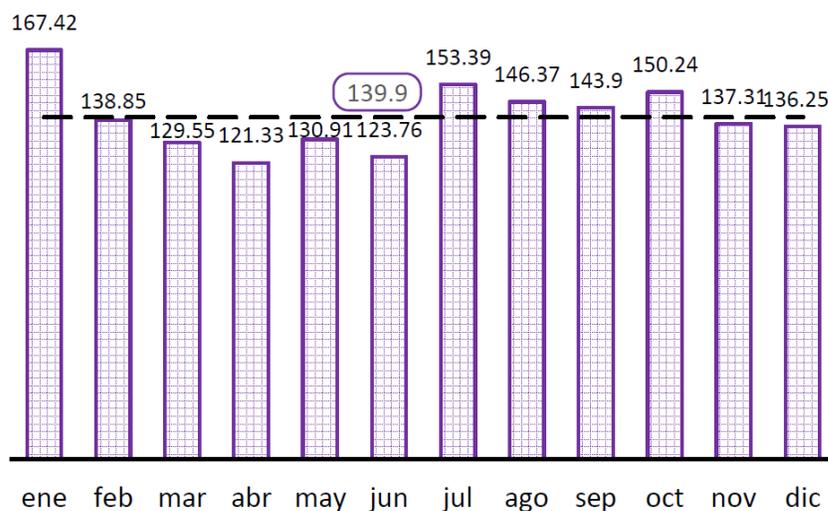


Figura 4-8. Brillo solar estación Esc. Samper Madrid.

Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S

4.2.5 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)

4.3 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).

4.3.1 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 4-3 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 Depósitos Aluviales	Ofg Qal
	Pleistoceno	Depósitos cuaternarios	Depósitos Coluviales	Qc
	Campaniano	Grupo Guadalupe (Ksg)	Fomación Labor y Tierna Fomación Plaeners Fomación Arenisca Dura	Ksglt Ksgpl Ksgd
Cretácico		Grupo Olini (Kso)	Fomación Lidita inferior Nivel de Lutitas	Ksli Ksl
	Santoniano		Fomación Conejo	Kscn
	Coniaciano		Fomación La Frontera	Ksf
	Turoniano		Fomación Simijaca	Kss
	Cenomaniano		Fomación Hiló	Kih
	Albiano	Grupo Villeta	Fomación Pacho Fomación Capotes	Kslp Kic
	Aptiano		Fomación Socotá	Kis
Barroniano		Fomación Trinchera-Miembro el tigre	Kitrt	

Fuente Ingeominas

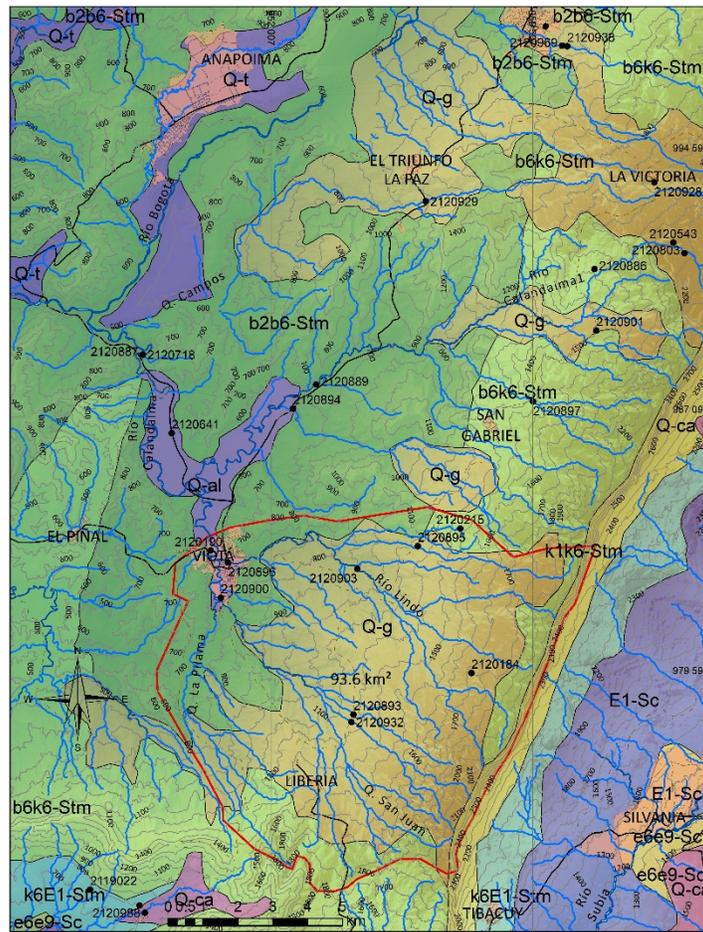


Figura 4-9 Unidades geológicas zonales – Fuente INGEOMINAS

4.4 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, 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 Lilibiana 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 4.4 se encuentran las coordenadas del punto inicial y final del tramo.

Tabla 4-4. Ubicación del tramo de la Piscina municipal – San Antonio.

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

Fuente: Elaboración propia⁸

⁸ Coordenadas en MAGNA SIRGAS – Sistema de proyección origen Bogotá -Fuente IGAC

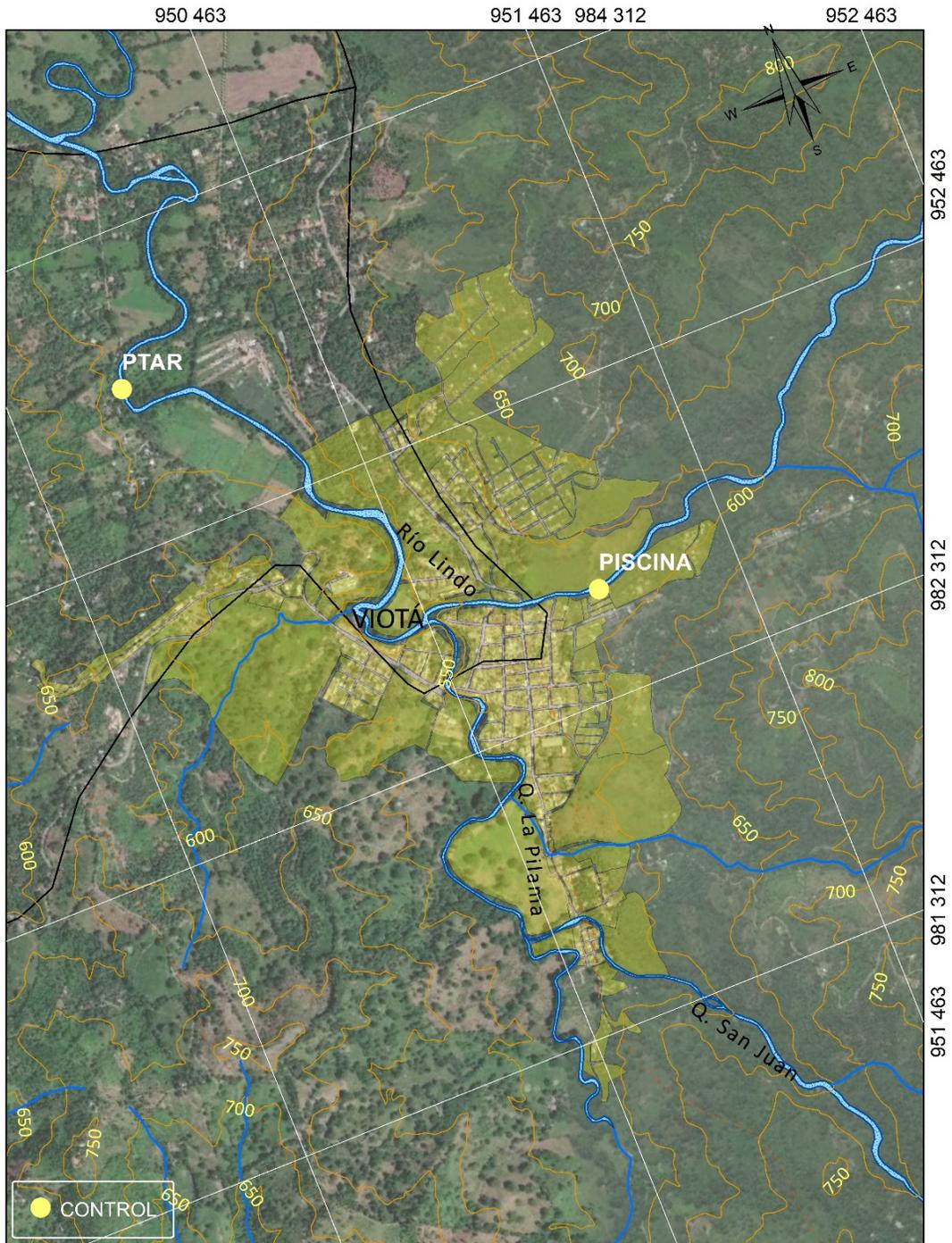


Figura 4-10. Ubicación general del tramo de evaluación.

En el barrio Santa Lilibiana del municipio de Viotá, 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.



Foto 4-1 Punto de Control – Vertedero zona de piscina

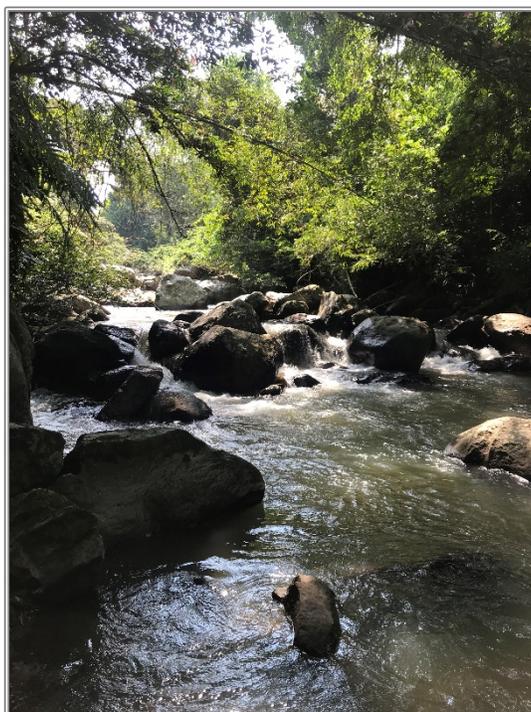


Foto 4-2 Sección cauce Rio Lindó aguas abajo de la zona de la piscina

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 600 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.



Foto 4-3. Confluencia del Río Lindo (Izq.) y la quebrada Pilama (Der.)

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.



Foto 4-11 Panorámica del cauce en la zona de la PTAR proyectada.

5 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 de aguas residuales por el municipio de Viotá. A continuación se describe en forma más detallada las actividades realizadas en campo y en el laboratorio de ambiental de la Escuela.

5.1 Actividades preliminares

Para los trabajos con la sonda multiparamétrica, en el laboratorio de ambiental de la Escuela se calibró las sondas con la sal que se utilizó para la conductividad, así, garantizar la calidad de los resultados en campo.



Foto 5-1 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 conductividad.

La Foto 5-2 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.



Foto 5-2 Primera ubicación muestreo y aforo. Fuente: elaboración propia



Foto 5-3 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.

5.2 Aforo

El levantamiento se llevó a cabo por medio del equipo Flowtracker 2, en diferentes puntos del 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 5-1, se muestra la ubicación en planta de las diferentes secciones de aforo y en la Foto 5-4 se observa el levantamiento topográfico con el equipo usado en la sección 1-1, correspondiente a de la piscina municipal.

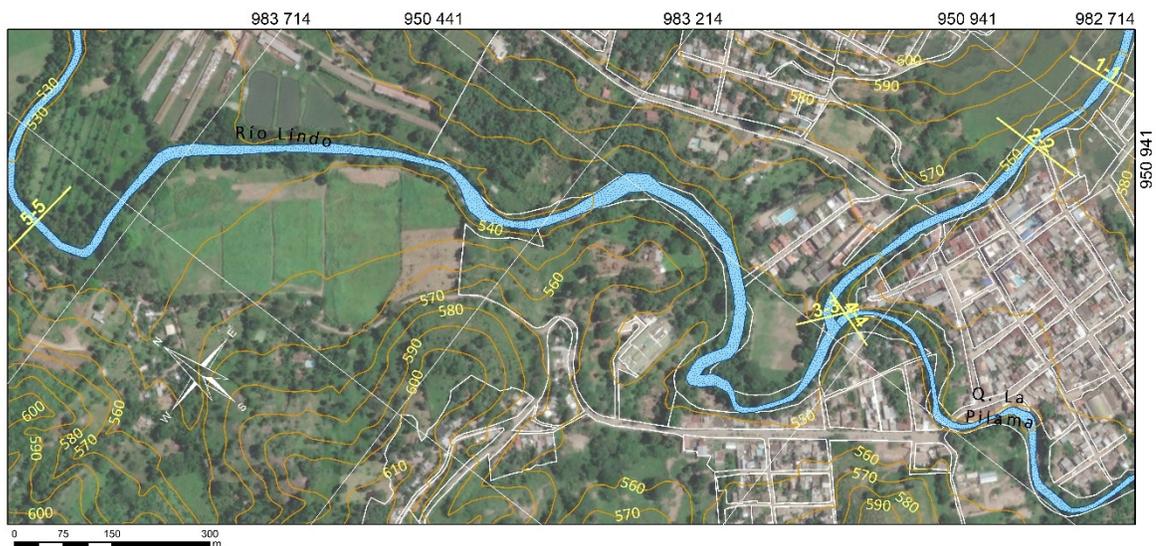


Figura 5-1. Ubicación en planta de las secciones de aforo. Fuente: elaboración propia

Tabla 5-1 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
4-4	Aguas arriba Q. Pilama con río Lindo
5-5	Sector de la PTAR



Foto 5-4 Aforo en la sección 1-1. Fuente: elaboración propia

5.2.1 Datos obtenidos del Flowtracker 2

La caracterización hidáulica 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 se presentan los datos registrados para la secciones de aforo donde se midieron velocidades y en el Anexo 02 se encuentran los archivos de reporte del equipo.

Tabla 5-2 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
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

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
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	

Tabla 5-3 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
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

Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
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	

Tabla 5-4 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	

Tabla 5-5 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	

Tabla 5-6 Datos de campo para la Sección 5-5

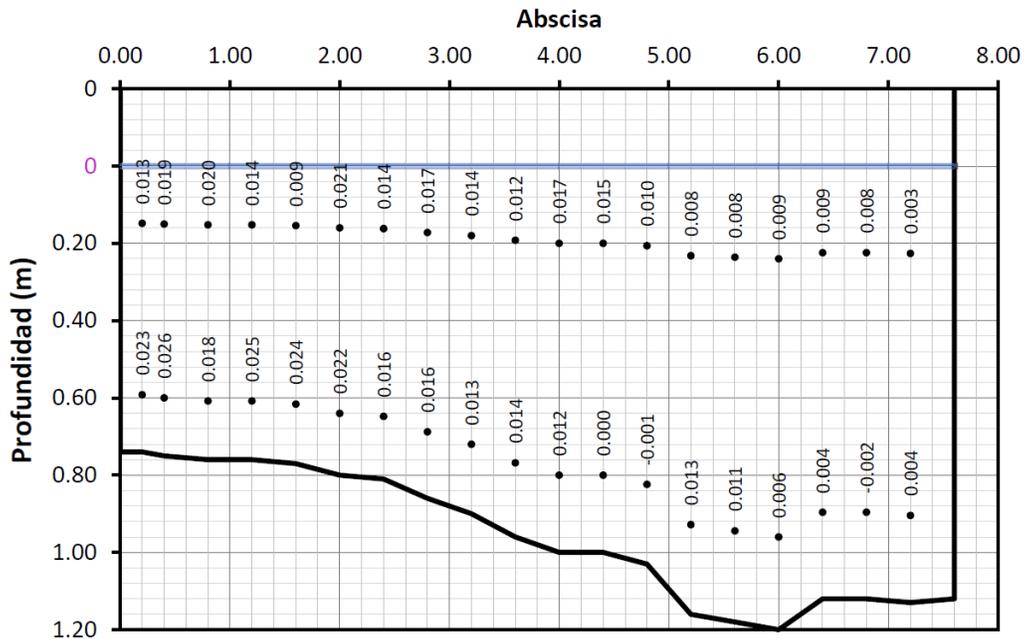
Estación	Abscisa [m]	Método Lectura	Prof. [m]	Prof. Medida [m]	Vel. [m/s]	Vel. Media [m/s]	Área [m ²]	Q [m ³ /s]
0	0	Ninguno	0.06	0.000	0.000	0.019	0.012	0.000
1	0.4	0.60	0.06	0.036	0.019	0.019	0.024	0.000
2	0.8	0.60	0.10	0.06	0.062	0.062	0.040	0.002
3	1.2	0.60	0.16	0.096	0.012	0.012	0.064	0.001
4	1.6	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	

Tabla 5-7 Sección transversal del tramo Río Lindo – Sección 1-1.

Estación de aforo - Río Lindo – Sección 1-1	
Parámetros	
Prof. media (m)	0.959
Velocidad media (m/s)	0.011
Temp. 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



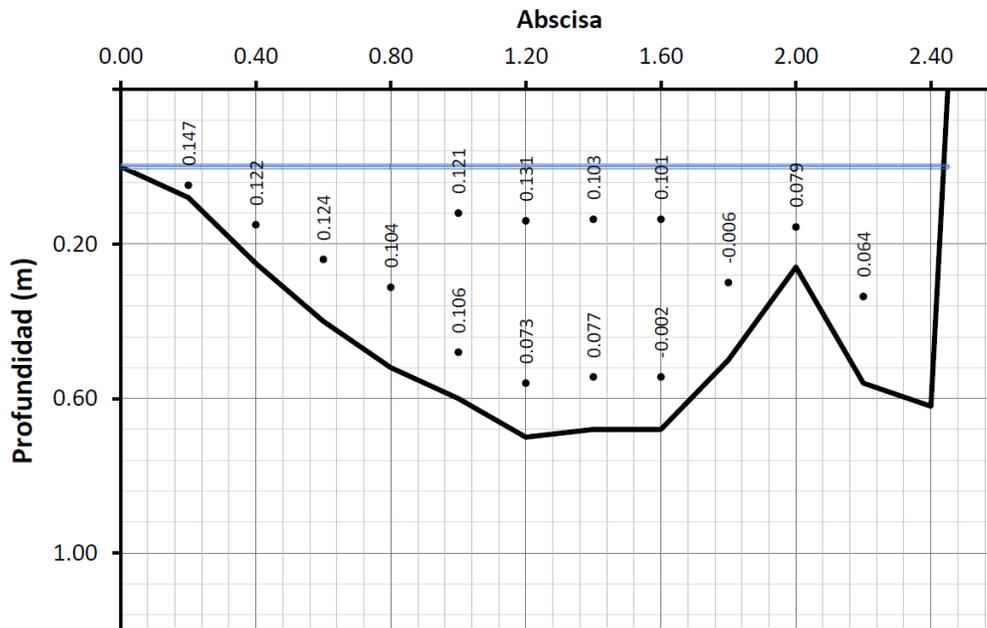
Fuente: elaboración propia

Tabla 5-8 Sección transversal del tramo Río Lindo – sección 2-2

Estación de aforo - Río Lindo – Sección 2-2	
Parámetros	
Prof. media (m)	0.462
Velocidad media (m/s)	0.079
Temp. 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

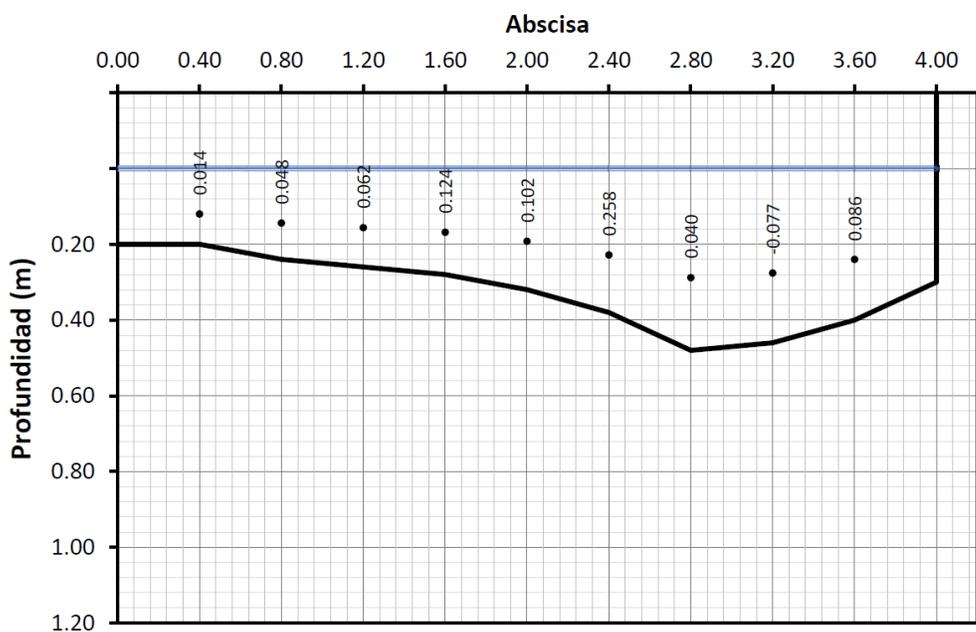
Tabla 5-9. Sección transversal del tramo Río Lindo – Sección 3-3.

Estación de aforo - Río Lindo – Sección 3-3

Parámetros	
Prof. media (m)	0.327
Velocidad media (m/s)	0.066
Temp. 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

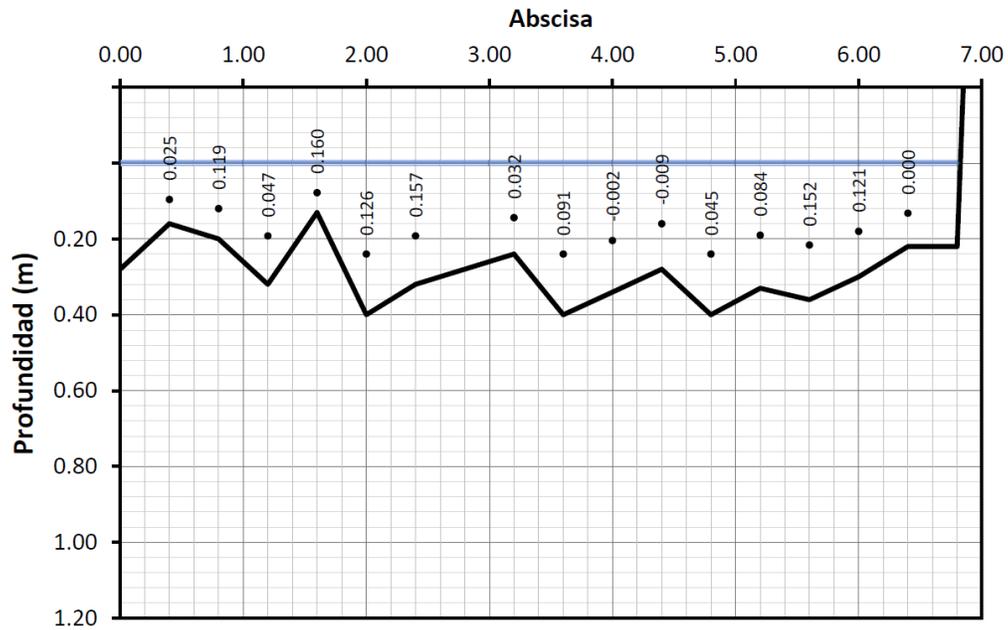
Tabla 5-10. Sección transversal del tramo Río Lindo – Sección 4-4.

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

Parámetros	
Prof. media (m)	0.290
Velocidad media (m/s)	0.075
Temp. 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



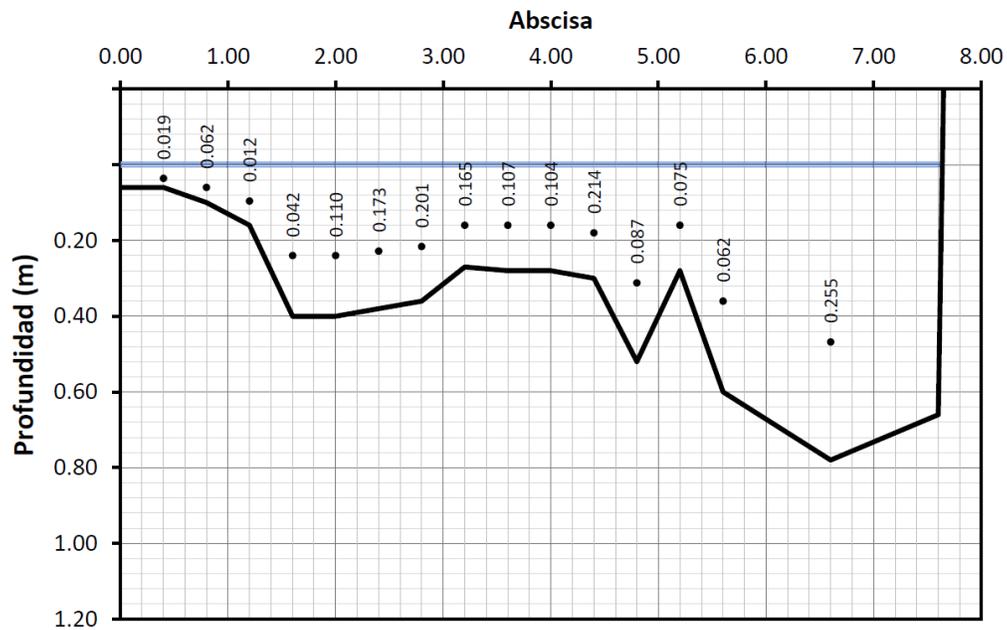
Fuente: elaboración propia

Tabla 5-11. Sección transversal tramo Q. La Pilama – Sección 5-5.

Estación de aforo - Río Lindo – 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

5.2.2 Método volumétrico descargas

Se realizaron los aforos en las cinco más representativas descargas mediante el método volumétrico, dado que eran las que presentaban continuidad en el flujo, las demás eran descargas que eran intermitentes. 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.

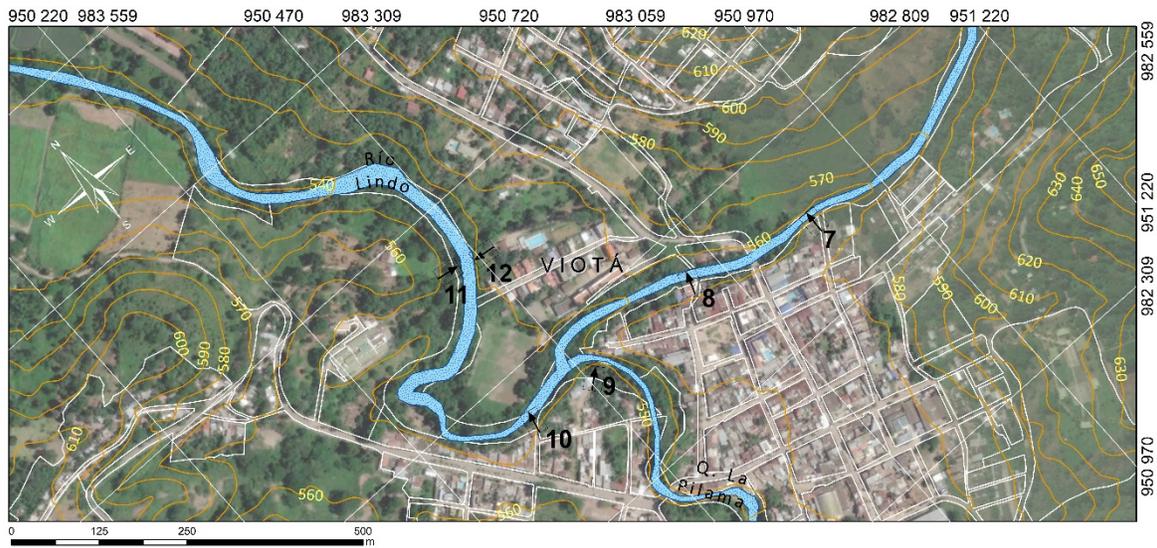


Figura 5-2 Ubicación de descargas principales sobre río Lindo - Viotá

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

Tabla 5-12 Descarga No. 7 – sector Cogoyo

Punto de descarga No. 7, margen izquierda río Lindo	
Coordenadas	
Este	Norte
950860	982692
Dimensiones	
Diámetro	4"
Material	
Gres	
Caudal	
0.0326	L/s
Descripción	
Sector Cogoyo	



Fuente: elaboración propia

Tabla 5-13 Descarga No. 8 – Carrera 12, puente peatonal.

Punto de descarga No 8, margen izquierda río Lindo	
Coordenadas	
Este	Norte
950681	982742
Dimensiones	
18 cm	8 cm
Material	
Concreto	
Caudal	
0.7167	L/s
Descripción	
Carrera 12, puente peatonal	



Fuente: elaboración propia

Tabla 5-14 Descarga No. 10 – Sector matadero.

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



Fuente: elaboración propia

Tabla 5-15 Descarga No. 11 – Vertimiento del Hospital.

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



Fuente: elaboración propia

Tabla 5-16 Descarga No. 12 – Vertimiento sector piscina Camoa.

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



Fuente: elaboración propia

5.3 Conductividad

Los trazadores son herramientas descriptivos 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 otro aguas 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 Foto 5-5

En la Figura 5-3 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.

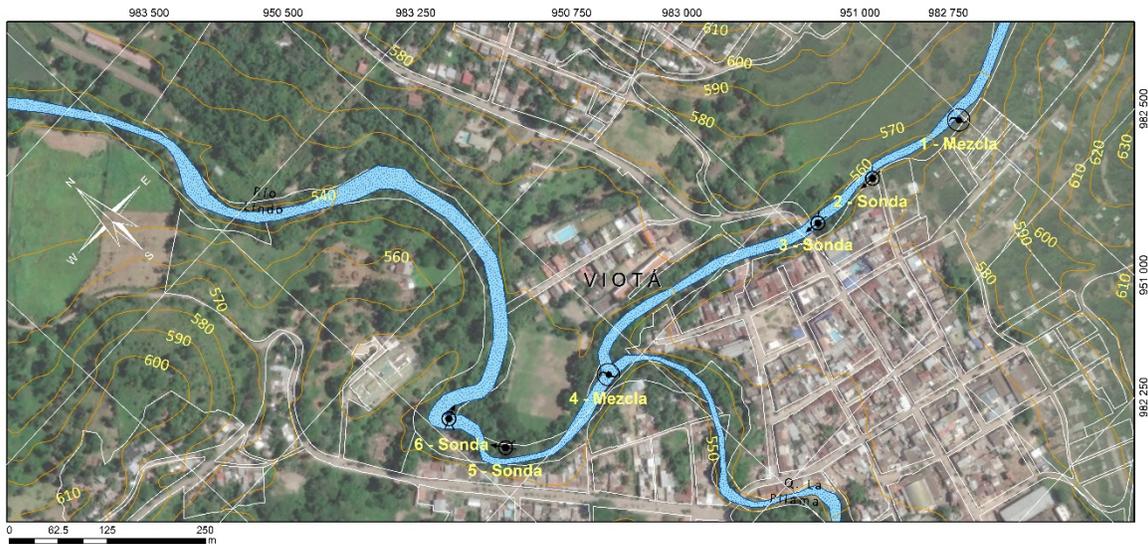


Figura 5-3. Ubicación puntos de control de Conductividad. Fuente: elaboración propia

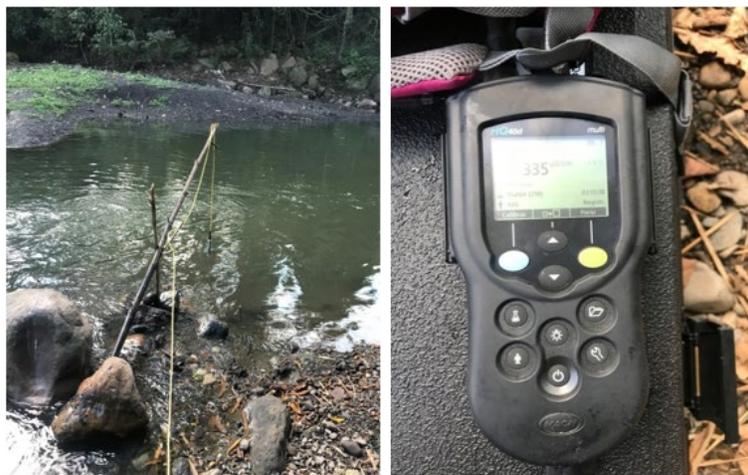


Foto 5-5 Ubicación de la sonda en el río Lindo. Fuente: elaboración propia

5.4 Tiempo medio de viaje del trazador

Para la correcta interpretación de los datos obtenidos en campo y realizar la implementación de los parámetros del modelo de calidad, es necesario conocer los tiempos de velocidad de mezcla para lo cual con el trazador y los equipos detectores se establece el tiempo de viaje, y por consiguiente la velocidad de viaje de la mezcla, es entender que las corrientes de flujo a lo largo del cauce no son uniformes y por consiguiente, el viaje de una masa o bloque de agua estará determinada por el tipo de rugosidades que hay en el cauce, los posibles obstáculos que deba sortear y el caudal disponible, o de otra forma la velocidad neta de la corriente. La importancia de la metodología radica en determinar el tiempo que tarda la masa de agua de un punto de control a otro punto de control.

Dada las características de la corriente de agua, se determinaron dos puntos de control como se indicó anteriormente uno aguas arriba del casco urbano y el otro inmediatamente aguas abajo de la confluencia del río Lindo y la quebrada Pilama. Ver Figura 5-3

El parámetro de conductividad es en Siemens por metro, y dada las características de la prueba, las unidades del aparato son en micro Siemens por centímetro $\mu\text{S}/\text{cm}$. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de los tiempos de viaje para este estudio en aguas arriba y aguas abajo de la confluencia.

Tabla 5-17 Velocidad de mezcla Tramos 1 a 3

Tramo	Duración	Distancia [m]	Velocidad [m/s]
1-3	00h: 53:24	232.8	0.073
1-2	00h: 30:04	139.7	0.077
2-3	00h: 23:20	93.1	0.067
Promedio			0.072

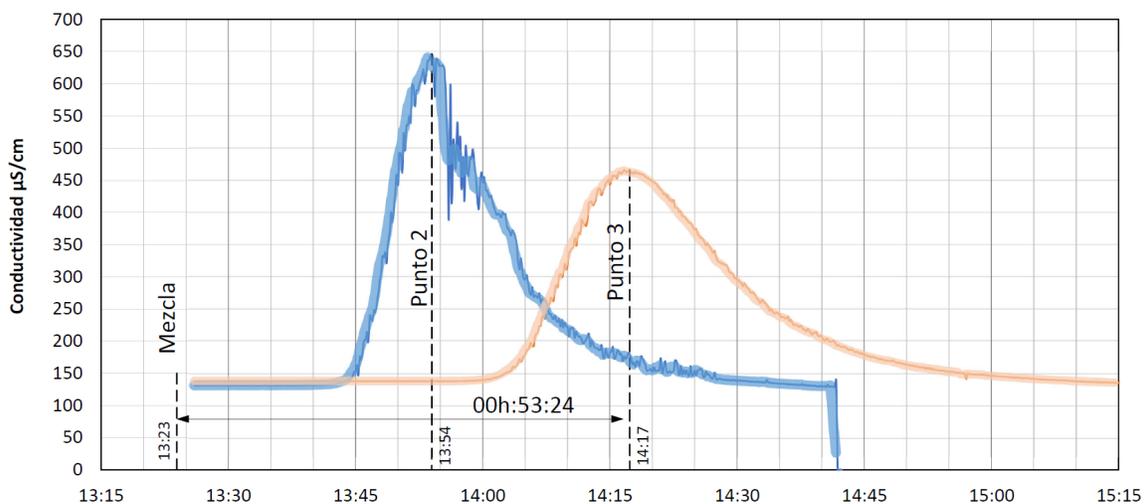


Figura 5-4. Diagrama del paso de la onda de concentración aguas arriba, (conductividad Vs. tiempo). Fuente: elaboración propia

Para el tramo que corresponde aguas abajo de la confluencia del río Lindo y la quebrada Pilama se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 5-18 Velocidad de mezcla Tramos 4 a 6

Tramo	Duración	Distancia [m]	Velocidad [m/s]
4-6	01h: 09:38	285.40	0.068
4-5	00h: 37:27	184.6	0.082
5-6	00h: 32:11	100.80	0.052
Promedio			0.068

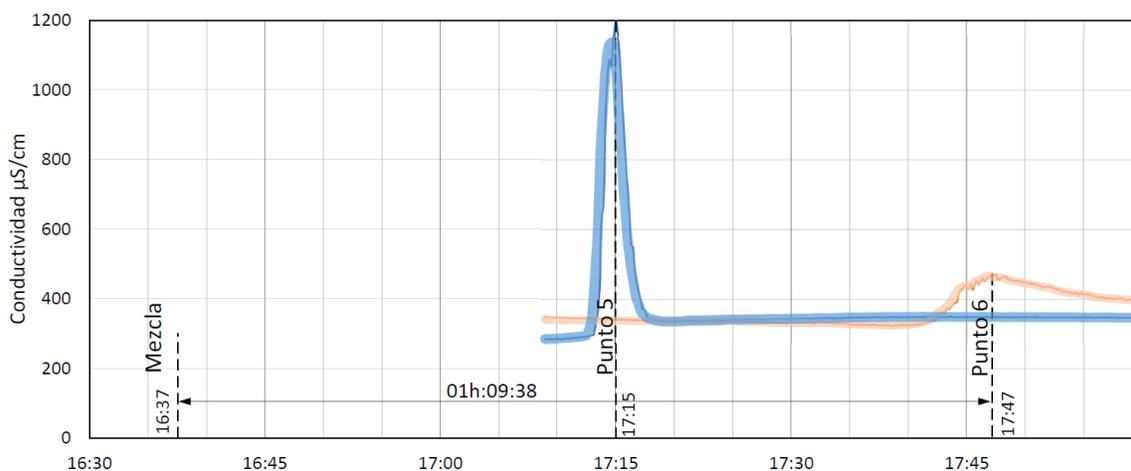


Figura 5-5. Diagrama del paso de la onda de concentración aguas abajo, (conductividad Vs. tiempo). Fuente: elaboración propia

Estos tiempos de viaje son de referencia para el correspondiente análisis del coeficiente de dispersión longitudinal, que se requiere para determinar en el modelo de calidad.

5.5 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:

5.5.1 Calibración Sonda 1 – Agua Destilada

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 5-19 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

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:

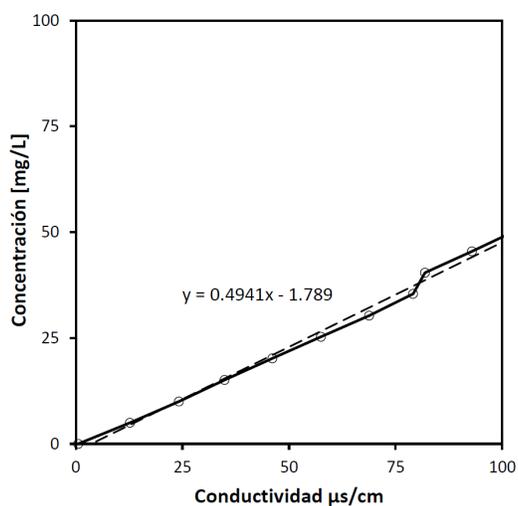


Figura 5-6 Curva de Calibración Sonda 1 – Agua destilada

5.5.2 Calibración Sonda 1 – Agua Río Lindo

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 5-20 Datos de correlación Sonda 1 - Agua río Lindo

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad $\mu\text{s/cm}$
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:

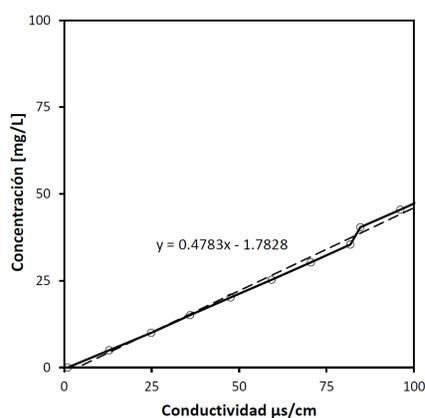


Figura 5-7 Curva de Calibración Sonda 1 – Agua río Lindo

5.5.3 Calibración Sonda 2 – Agua Destilada

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 5-21 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:

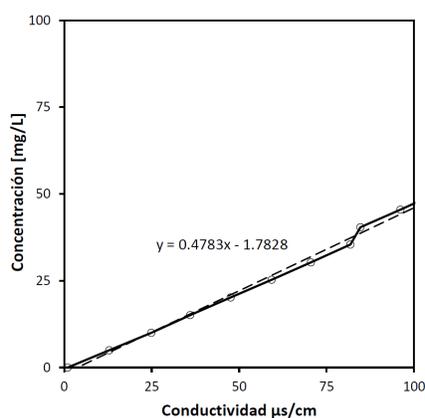


Figura 5-8 Curva de Calibración Sonda 2 – Agua destilada

5.5.4 Calibración Sonda 2 – Agua Río Lindo

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 5-22 Datos de correlación Sonda 2 - Agua río Lindo

Sal [g]	Sal [mg]	Concentración [mg/L]	Conductividad $\mu\text{s/cm}$
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 la siguiente coeficientes al realizar un análisis de mínimos cuadrados de un polinomio de grado uno:

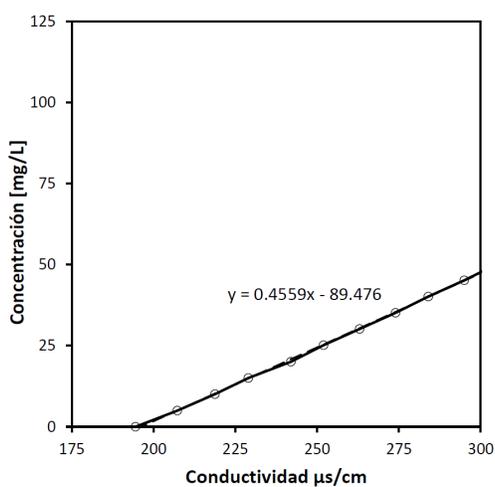


Figura 5-9 Curva de Calibración Sonda 1 – Agua río Lindo

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.

5.6 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:

5.6.1 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 mismo 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:

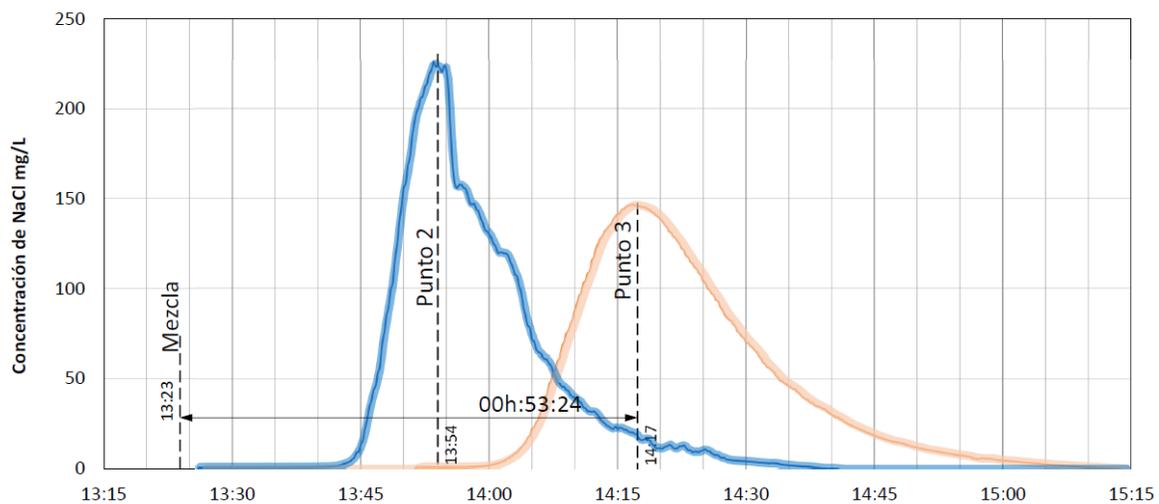


Figura 5-10. Normalización de valores del trazador – Tramos 1 – 2 - 3

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.

5.6.2 Tramo 4-6

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

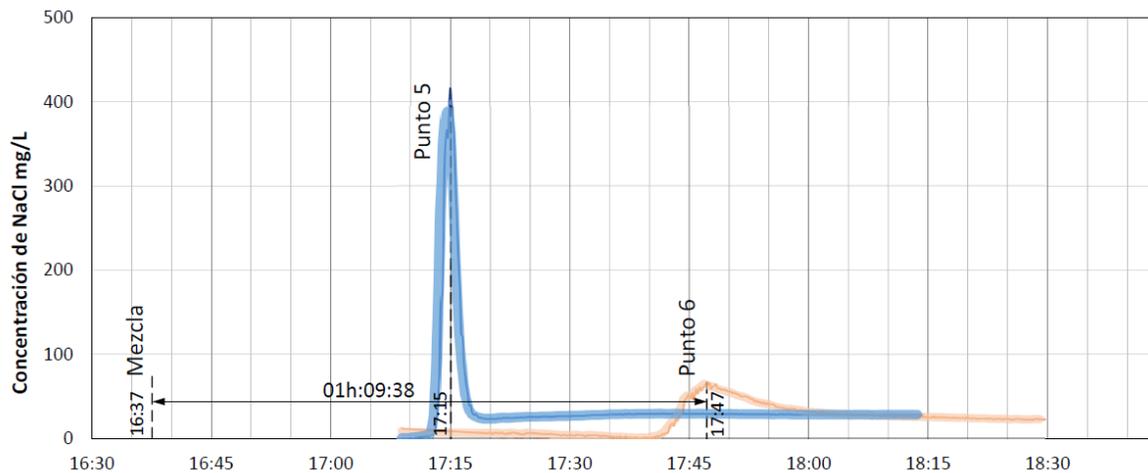


Figura 5-11. Normalización de valores del trazador – Tramos 4 – 5 - 6

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.

5.7 Coeficiente de dispersión longitudinal

5.7.1 Marco teórico

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

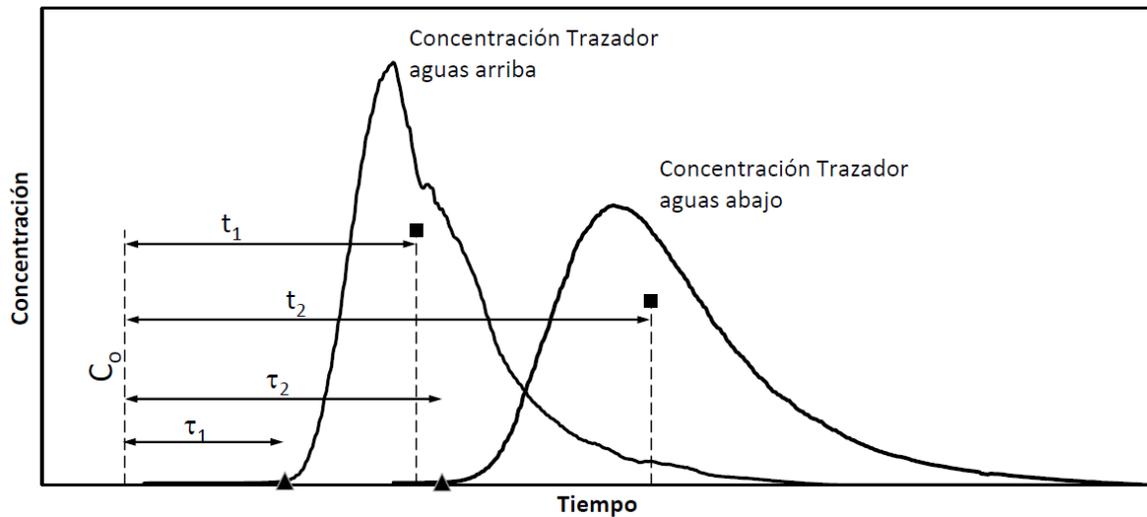


Figura 5-12 Parámetros del modelo ADZ (Botero, 2015)

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.

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

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

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 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).

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

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

$$\bar{V}_{m\acute{a}x} = \frac{L}{\tau} \quad (ecu. 3)$$

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:

$$\bar{t} = \frac{\sum \left(A_i \frac{1}{2} (t_{i-1} + t_i) \right)}{\sum A_i} \quad (ecu. 4)$$

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 las 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 o segundo momento 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.

5.7.2 Resultados Tramo 1-2-3

Con los cálculos realizado se obtuvieron los siguientes valores:

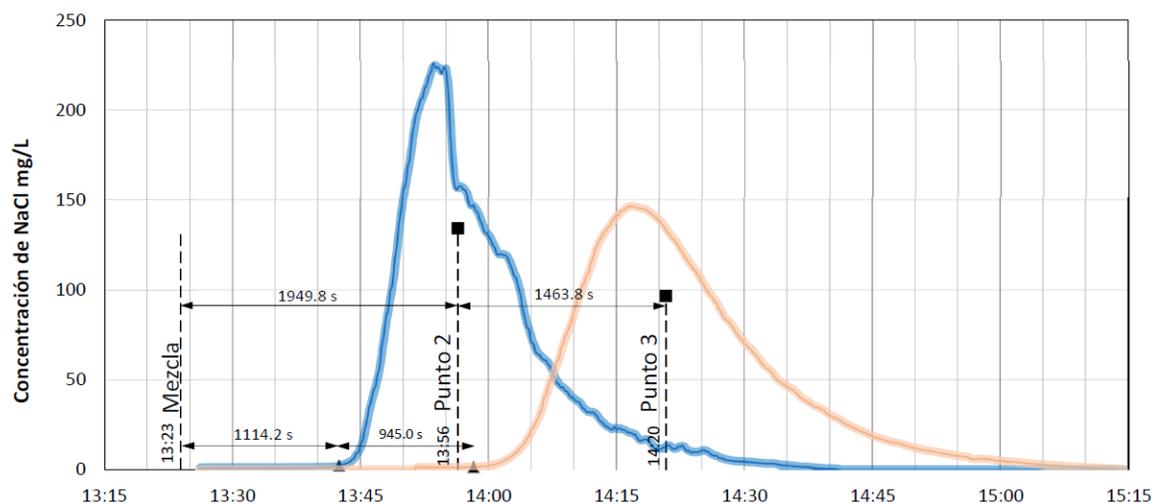


Figura 5-13. Parámetros tramo 1-2-3. CDL

Tabla 5-23 Resultado de análisis de CDL – Tramo 1-2-3

	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
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

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
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

5.7.3 Resultados Tramo 4-5-6

Con los cálculos realizado se obtuvieron los siguientes parámetros:

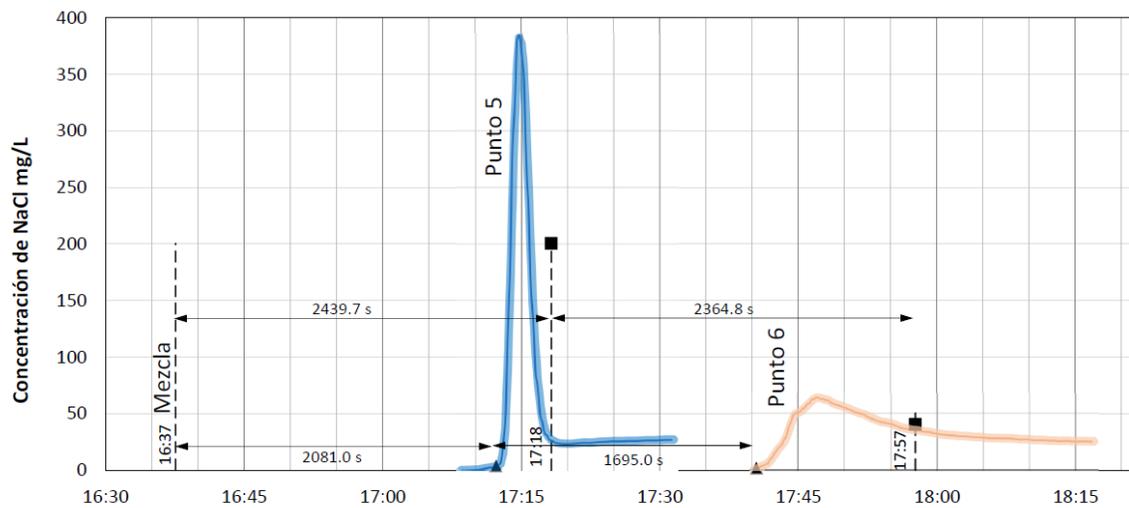


Figura 5-14. Parámetros tramo 4-5-6. CDL

Tabla 5-24 Resultado de 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
Longitud Tramo [m]		145	100.8
Velocidad media de Viaje [m/s]		0.059	0.043
Velocidad al pico [m/s]		0.065	0.052
Velocidad máxima [m/s]		0.070	0.059
Caudal Observado		0.234	0.234
Área media de sección [m ²]		3.093	5.490
Área Medida Campo [m ²]		-	-
Cte. Dispersión Long. [m ² /s]		0.10	0.10

Fuente: elaboración propia

5.8 Coeficiente de Manning

De acuerdo con los resultados del análisis de CDL, se puede inferir el coeficiente de Manning asociado al tramo e implementarlo en el modelo hidráulico.

Partiendo de la ecuación de Manning

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

Para lo cual el término desconocido es el coeficiente de Manning

La pendiente se toma como la pendiente promedio entre los puntos de control

Tabla 5-25. Coeficiente de Manning Tramo 2 a 3

	Punto 2	Punto 3	Punto 5	Punto 6
Cota [m]	563	558.7	551	550.95
Longitud [m]		93.1		100.8
Pendiente [m/m]		0.04618		0.000992
Área Mojada [m ²] (Promedio)		1.368		1.308
Ancho medio [m] (Tabla 5.9)		4.0		8.55
Radio hidráulico [m]		0.281		0.147
Velocidad Media [m/s]		0.064		0.045
Cte. Manning [m ^{-1/3} /s]		1.487		0.195

Fuente: elaboración propia

5.9 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.

5.9.1 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 influyentes 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.

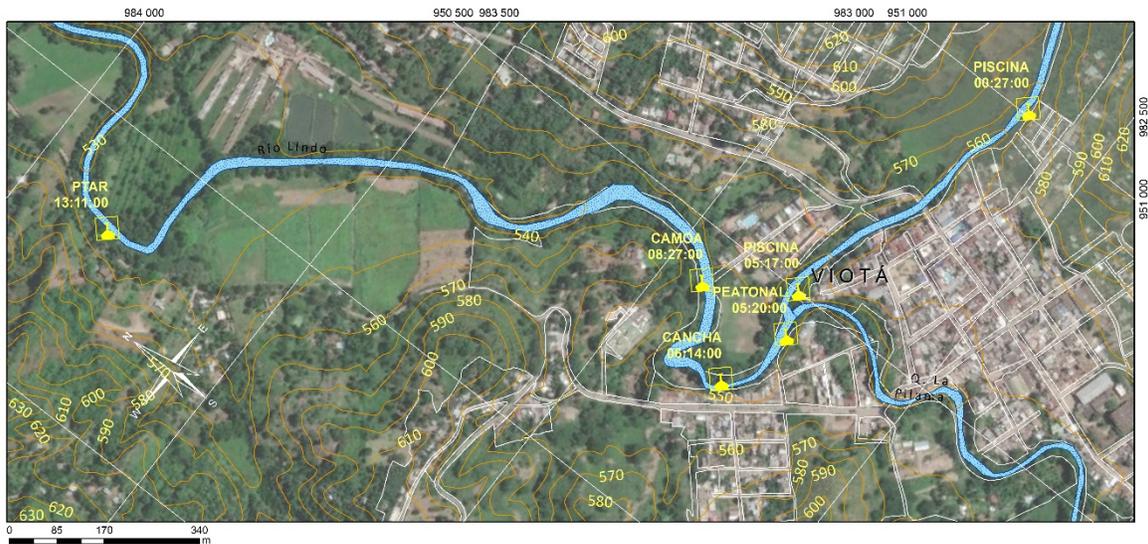


Figura 5-15. Estaciones de muestreo de la red monitoreo.

5.9.2 Muestreo

Conocido los valores de velocidad de mezcla, se procedió a identificar para cada punto de descargas a qué hora se debía tomar las muestras para tomar muestras de la misma masa de agua, es así que se inició la toma a las 00:27 y se terminaron de tomar las muestras a las 13:11. Ver Figura 5-15

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 manganoso ($MnSO_4$), 1 ml alcalino yoduro nitrato 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 este caso no se necesitó que la toma de muestra fuera en un tiempo específico. Ver Foto 5-6 donde se observa la toma de muestra de la descarga 8 en la carrera 12, puente peatonal.



Foto 5-6 Toma de muestra de una descarga de A.R.

5.10 Resultados del 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 5-26.

Tabla 5-26. Métodos aplicados en el laboratorio de ambiental de la Escuela

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

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 Foto 5-7.



Foto 5-7 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^{2+} 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 5-27 los milímetros (ml) gastados de tiosulfato de sodio y el oxígeno disuelto obtenido para cada uno de los puntos.

Tabla 5-27. Oxígeno disuelto obtenido en el laboratorio. Fuente: elaboración propia

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
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

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

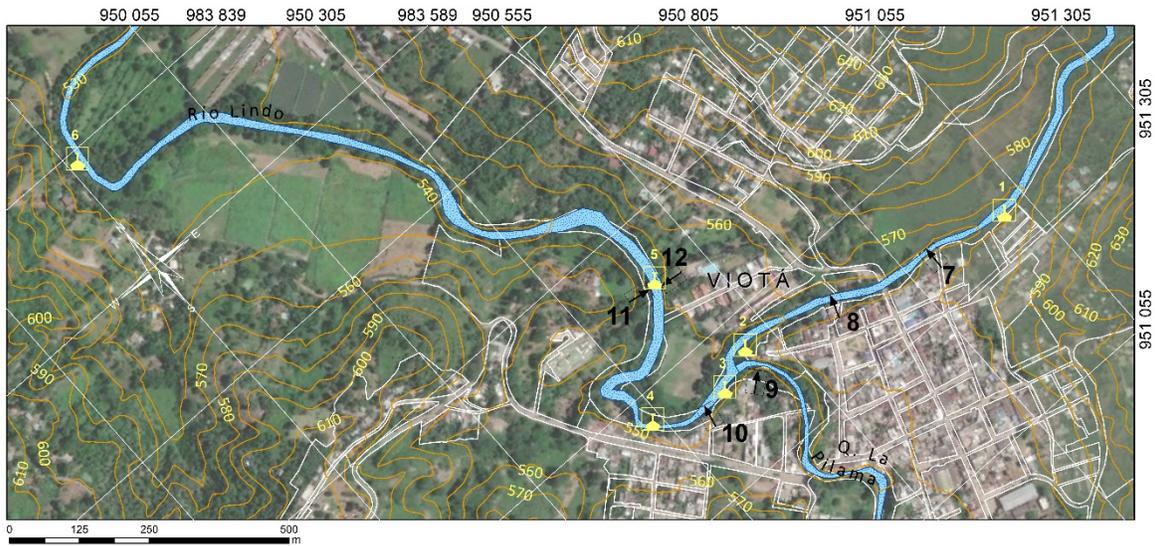


Figura 5-16 Distribución espacial de las muestras para los ensayos de laboratorio. Fuente: elaboración propia

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



Foto 5-8 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 veinte cuatro (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.



Foto 5-9 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 milímetros (ml) de muestra para agregar a cada botella de DBO.

En la Tabla 5-28 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 5-28. 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

Punto de muestreo	Muestra [ml]	FAS [ml]	DQO [mg O ₂ / L]	DBO ₅ estimada	Muestra DBO ml
D.8	1.0	1.1	205.714	102.857	10
	2.0	1.6	51.429	25.714	20
	2.5	1.65	27.429	13.714	20
Q.9	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.



Foto 5-10 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.



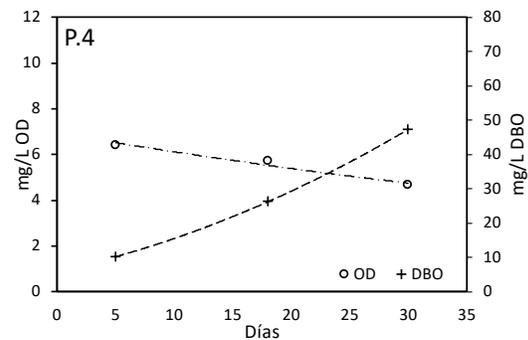
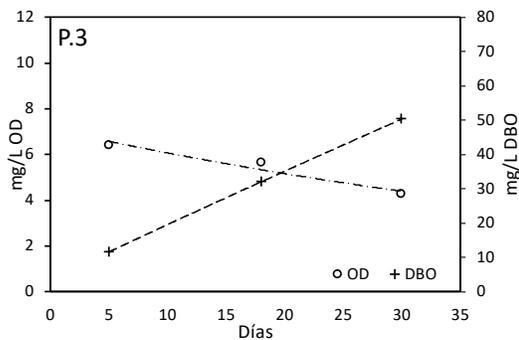
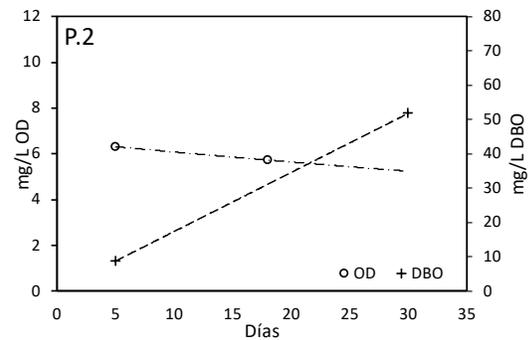
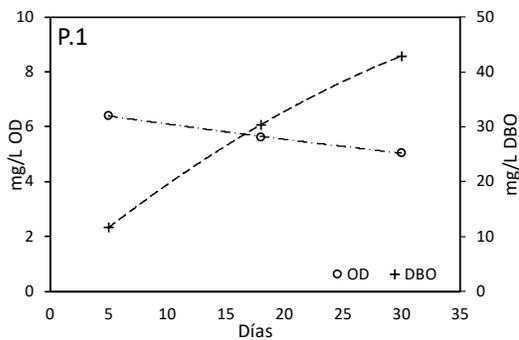
Foto 5-11 Titulación del O.D. de cinco días. Fuente: elaboración propia

A continuación, 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 dia^{-1} a 20°C y en base 10.

Tabla 5-29 Resultados del Oxígeno disuelto y DBO -Fuente: elaboración propia

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	DBO 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



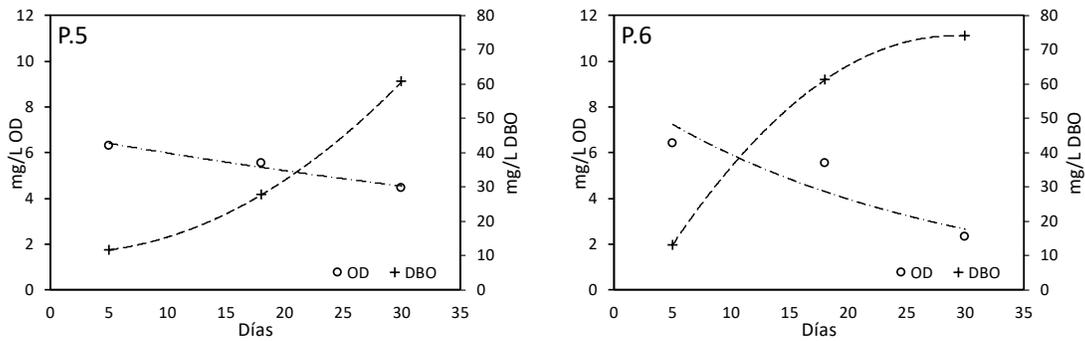


Figura 5-17 Resultados del Oxígeno disuelto -Fuente: elaboración propia

5.11 Estimación de tasa de Oxidación DBOc

Se tiene que al realizar un balance de masa en un reactor para DBO, los valores remanentes se obtienen con una ecuación diferencial de primer orden según (Chapra 1997) es:

$$V \frac{dL}{dt} = -K_1 VL$$

Siendo V el volumen de la muestra, K_1 es la tasa de oxidación de la muestra orgánica (de primer orden), L será el equivalente de materia orgánica que se oxida, expresada en equivalentes de oxígeno.

Ahora si se conoce el valor de L en el tiempo cero, que se denotará como L_0 , la solución de la ecuación anterior será:

$$L = L_0 e^{-K_1 t}$$

Por lo tanto, el consumo de oxígeno para cualquier instante de tiempo será:

$$y = L_0 - L$$

Y estará relacionado con los valores de DBO a través del tiempo, y será de utilidad para establecer el valor de K_1 , conociendo los valores de la DBO obtenidos en el laboratorio para diferentes tiempos.

$$y = L_0(1 - e^{-K_1 t})$$

Una vez analizados los diferentes métodos encontrados en la literatura, se adopta el método de Thomas, haciendo una variación en la estimación de los constantes K_1 y L_0 , para luego haciendo un ejercicio de modelación de solver en hoja electrónica se afinan los resultados.

5.12 Método de Thomson para el K_1

Es un método gráfico desarrollado por Thomas en 1950, en donde por el desarrollo de series de Taylor se descompone el exponencial como una suma de serie:

$$(1 - e^{-K_1 t}) = K_1 + \left[1 - \frac{K_1}{2}t + \frac{K_1}{6}t^2 + \frac{K_1}{24}t^3 \right]$$

Y del desarrollo de la serie del término del cubo (Salazar, 1996):

$$K_1 + \left[1 + \frac{K_1}{6} \right]^3 = K_1 + \left[1 - \frac{K_1}{2}t + \frac{K_1}{6}t^2 + \frac{K_1}{24}t^3 \right]$$

Por lo tanto y se puede transformar en:

$$y = L_0 K_1 + \left[1 + \frac{K_1}{6} \right]^{-3}$$

Al linealizar la anterior ecuación para que quede de la forma $Y = mX + b$, se tiene:

$$\left[\frac{t}{y} \right]^{1/3} = K_1 L_0^{-1/3} + t \left[\frac{K_1^2}{6L_0} \right]^{1/3}$$

Conociendo los valores de DBO remanente y , medidos en diferentes días t , se puede graficar $\left[\frac{t}{y} \right]^{1/3}$ contra el tiempo (días), por lo tanto al encontrar el intercepto con el eje vertical y la pendiente de la línea generada se obtendrán los valores de K_1 y L_0 .

$$K_1 = 6 \frac{m}{b}$$

$$L_0 = \frac{1}{m^3 K_1}$$

Dado que se cuenta con las herramientas de la hoja de cálculo, para realizar de manera numérica el cálculo de m y b, a continuación se presentan los resultados:

Tabla 5-30 Cálculo de K_1 y L_0 por método Thomson

	$\left[\frac{t}{y} \right]^{1/3}$			m	b	K_1 [1/d]	L_0
Días	5	18	30				
P.1	0.75	0.96	0.89	0.0055	0.7704	0.0426	51.30
P.2	0.83	0.82	0.83	0.0001	0.8272	0.0009	1939.37
P.3	0.75	0.83	0.84	0.0035	0.7448	0.0284	85.22
P.4	0.79	0.88	0.86	0.0029	0.7925	0.0217	92.37
P.5	0.75	0.87	0.79	0.0016	0.7763	0.0120	177.41
P.6	0.73	0.67	0.74	0.0005	0.7009	0.0045	641.63

Fuente: elaboración propia

Al comparar los valores con la ecuación de y para la DBO_{30} , se encuentran diferencias para lo cual mediante una corrección numérica utilizando la función solver de la hoja de cálculo, se recalcula el parámetro K_1 y L_0 a partir de los valores obtenidos por Thomson, para que el valor de la ecuación de igual al DBO_{30} .

Tabla 5-31 Ajuste por Solver

	K_1	L_0
P.1	0.0433	59.01
P.2	0.0079	246.71
P.3	0.0134	152.31
P.4	0.0130	146.19
P.5	0.0093	248.83
P.6	0.0104	274.84
Promedio	0.0162	187.981

Fuente: elaboración propia

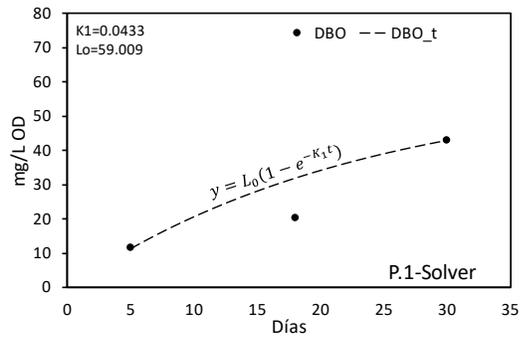
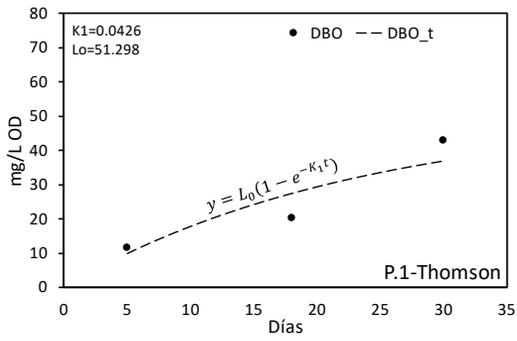


Figura 5-18 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.1

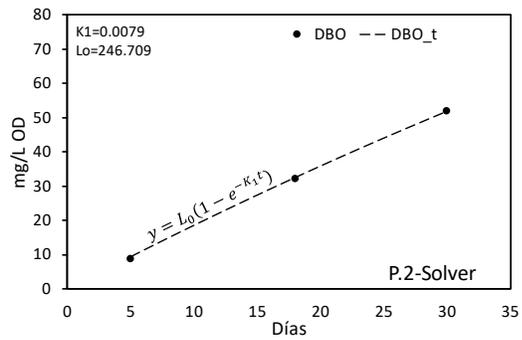
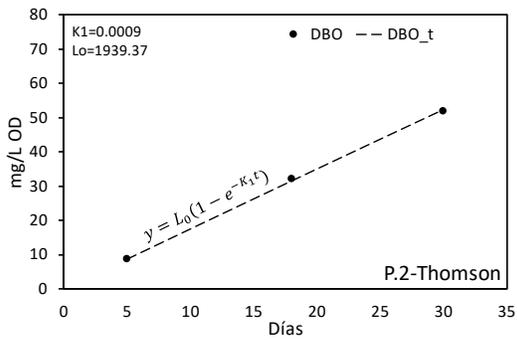


Figura 5-19 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.2

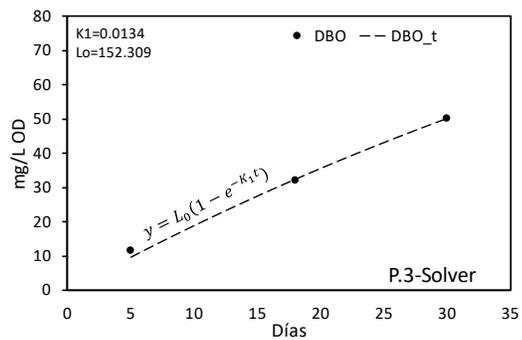
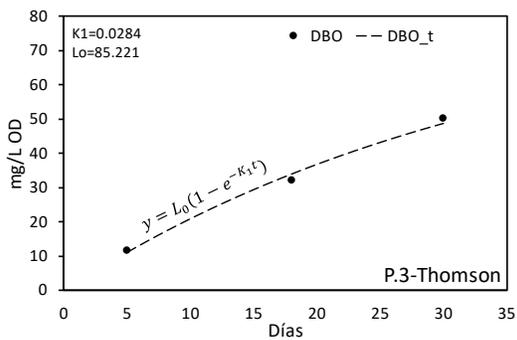


Figura 5-20 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.3

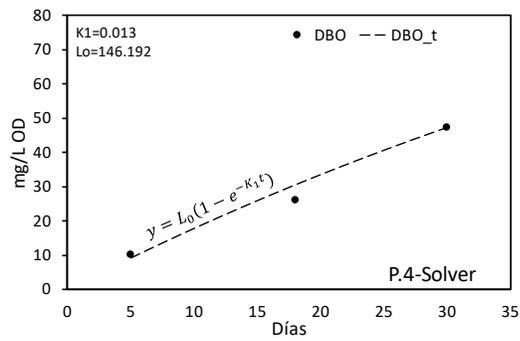
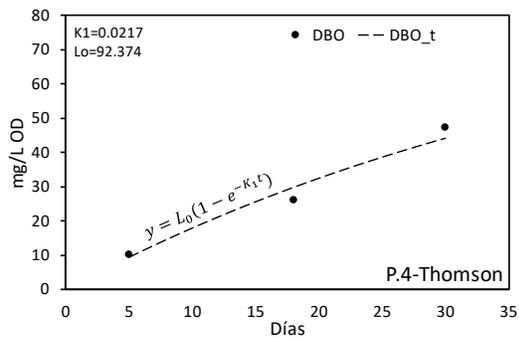


Figura 5-21 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.4

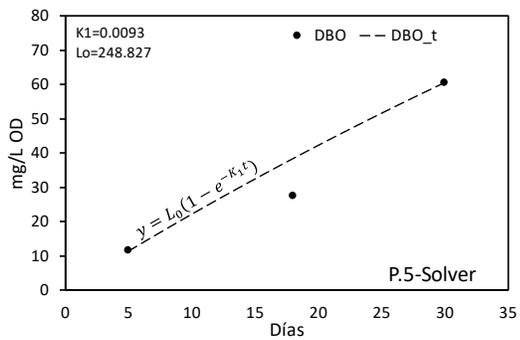
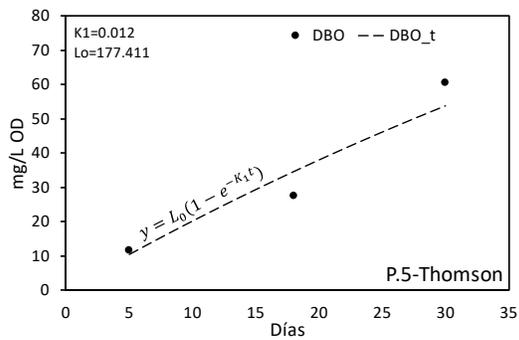


Figura 5-22 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.5

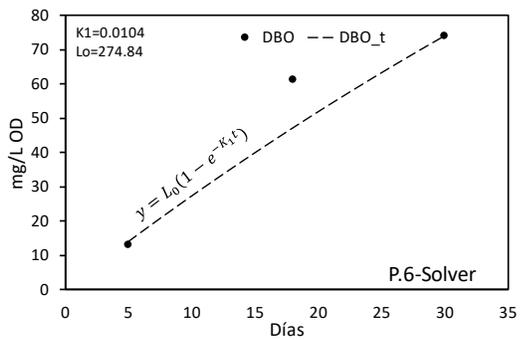
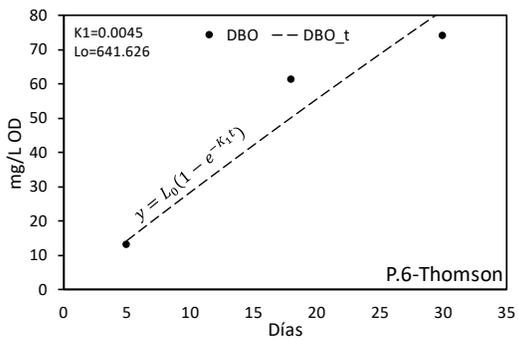


Figura 5-23 Comparativo de valores de K_1 y L_0 – P.6

5.13 Estimación Tasa de oxidación K_d

Para la determinación de K_d se utilizará la metodología de Hydroscience que a partir de datos experimentales estableció la siguiente ecuación:

$$K_d = 1.675C \left[\frac{H}{8} \right]^{-4.34}$$

Siendo H la lámina de agua en la sección de análisis, C un coeficiente que vale 0.2 para lechos poco estables (arenas con limos y arcillas) y 0.30 para lechos estables tipo rocoso (montaña).

Tabla 5-32 Estimativo de K_d

Punto	H [m]	C	K_d [1/d]
P.1	0.20	0.25	2.076
P.2	0.18	0.25	2.173
P.3	0.20	0.25	2.076
P.4	0.46	0.25	1.446
P.5	0.20	0.25	2.076
P.6	0.40	0.25	1.536

Fuente Elaboración propia

Thoma y Muller (1978), encontraron que K_d varía entre 0.1 y 0.5 [1/d] para aguas profundas y para aguas poco profundas o someras valores entre 0.5 y 3 [1/d].

5.14 Estimación Tasa de sedimentación K_s

Para la determinación de la constante de sedimentación, que de acuerdo con hay una relación entre el tamaño de la partícula en μm y su velocidad de sedimentación en [m/d] Chapra (1997), para ellos se utiliza la siguiente clasificación:

Tabla 5-33 Velocidades de particulado en ríos

Particulado	\emptyset [μm]	V_s [m/d]
Carbono orgánico particulado	1 - 10	0.20
	10 - 64	1.50
	> 64	2.3
Arcillas	2 - 4	0.3 - 1
Limos	10 - 20	3 - 30

Fuente Chapra (1997)

Con lo anterior y mediante la siguiente expresión se calcula K_s :

$$K_s = \frac{V_s}{H}$$

De acuerdo con los datos se tiene para cada punto de interés los siguientes valores de K_s :

Tabla 5-34 Estimativo de K_s

Punto	H [m]	V_s [m/d]	K_d [1/d]
P.1	0.20	15	0.013
P.2	0.18	15	0.012
P.3	0.20	15	0.013
P.4	0.46	15	0.031
P.5	0.20	15	0.013
P.6	0.40	15	0.027

Fuente: Elaboración propia

Se toma una velocidad de sedimentación de 15 [m/d]

, dado que el cuerpo de agua es del tipo montañoso, y adicional la corriente presenta láminas bajas, por lo tanto una posible resuspensión debida por las corrientes es poco probable y por tener aguas pocos profundas, la sedimentación se da mucho más rápido.

5.15 Estimación de tasa de Aireación Ka

Se toma como método el correspondiente de Queens – Gibbs (Chapra 1997), donde tiene una expresión que aplica para ríos tipo montañosos y los rangos de velocidades aplican para el caso de estudio:

$$K_a = 5.32 \frac{V^{2/3}}{H^{1.85}}$$

Que aplica para velocidades de la corriente entre 0.03 y 0.55 [m/s] y profundidades entre 0.12 y 0.73 [m], con lo anterior tendremos los siguientes valores:

Tabla 5-35 Estimativo de Ka

Punto	H [m]	V [m/d]	Ka [1/d]
P.1	0.20	0.064	16.72
P.2	0.18	0.056	18.58
P.3	0.20	0.043	12.82
P.4	0.46	0.041	2.66
P.5	0.20	0.150	29.49
P.6	0.40	0.159	8.51

Fuente: Elaboración propia.

5.16 Corrección por temperatura

Se tendrá en cuenta la siguiente corrección de temperatura:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20}$$

Para valores de temperatura entre 10 a 30 [°C], con $\theta = 1.047$ y K_{20} igual a 1 [1/d]. (Phelps y Theriault, 1927).

Dado que en campo se encontró que la temperatura promedio para los puntos donde se tomó, es de 24°C, y con el término K_{20} , la corrección por temperatura es

$$K_T = 1 \times 1.047^{24-20} = 1.201$$

5.17 Demanda de oxígeno de sedimento

Dado que no se realizó un análisis en laboratorio para la estimación de la demanda de oxígeno de sedimento, se tomará un valor de 0.15 [g/m²d] teniendo en cuenta el estudio de Demanda de oxígeno por sedimentos en diferentes tramos del río Negro Rionegro, Antioquia, Colombia, realizado por Carlos Augusto Benjumea Hoyos y Geraldine Álvarez Montes en cooperación con la universidad Católica de Oriente Rionegro y CORPONARE entre los años 2014 y 2015, que corresponde a un río de montaña.

5.18 Resumen de los coeficientes

En la siguiente tabla se relacionan los valores encontrados de las tasas o constantes a utilizar en el modelo de calidad.

La tasa de remoción se tomará como la suma de K_d y K_s

$$K_r = K_d + K_s$$

Tabla 5-36 Resumen de coeficientes para modelo hidráulico.

Punto	K ₁ [1/d]	K _d [1/d]	K _s [1/d]	K _a [1/d]	K _r [1/d]
P.1	0.0433	2.076	0.013	16.72	2.089
P.2	0.0079	2.173	0.012	18.58	2.185
P.3	0.0134	2.076	0.013	12.82	2.089
P.4	0.0130	1.446	0.031	2.66	1.477
P.5	0.0093	2.076	0.013	29.49	2.089
P.6	0.0104	1.536	0.027	8.51	1.563
Promedio	0.0162	1.897	0.018	14.797	1.915
Máximo	0.0433	2.173	0.031	29.49	2.185
Mínimo	0.0079	1.446	0.012	2.66	1.477

Fuente: Elaboración propia

De los valores anteriores y dado que para el modelo de calidad aplican de manera general estos coeficientes, es decir no se realiza por tramos o sectorizado, se iniciará la modelación con los valores promedios calculados en la tabla 5-36

6 Modelación: componente hidráulico

Un modelo es la representación de un sistema. Un modelo es una aproximación a un sistema del cual, a través de un experimento, se pueden obtener respuestas sobre el sistema. Un modelo no necesariamente implica la utilización de un programa de computador. Un modelo puede ser un pedazo de hardware o simplemente el entendimiento de cómo trabaja un sistema. Los modelos a menudo se codifican en un programa de computador. (Carlos Alberto Sierra Ramírez, pág., 430)

Como se describió en el numeral 5.6, donde el motor geométrico del modelo en el programa IBER es un mallado en 2D, la información necesaria está basada en información de curvas de nivel restituídas a 0.50 m y luego transformadas a un archivo tipo ráster de elevaciones.

Los valores de los parámetros de rugosidades, caudales y otros necesarios se implementan directamente en el programa.

Canale et. Al (1995) consideran que un modelo ha sido variado cuando las respuestas de las simulaciones reproducen con precisión los datos de campo. Por lo que la recopilación de datos del sistema resulta fundamental ya que todos los resultados producidos por el modelo están basados en los datos de entrada de las fronteras.

6.1 Datos meteorológicos

La información climatológica recopilada fue obtenida por las estaciones pertenecientes a la Corporación autónoma regional de Cundinamarca e Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales mencionadas anteriormente.

Las estaciones Esc. Samper Madrid, Col. Francisco J. de Caldas, Viotá, Laguna del indio y Pajas blancas son las más cercanas a la zona de estudio del río Lindo y las que poseen datos suficientes para la modelación. Los parámetros meteorológicos requeridos para este modelo son presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, radiación, nubosidad y velocidad del viento.

6.2 Datos de calidad del agua

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

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. Posteriormente, estas muestras fueron analizadas en el laboratorio.

6.3 Fuente de la información

Para la generación del modelo, se utilizaron curvas de nivel provistas por la CAR, para la zona de estudio del tramo del río Lindo en el municipio de Viotá. Las curvas de nivel están dentro del rango de la cota 570 m.s.n.m., y la cota 525 m.s.n.m., cerca de la confluencia de los ríos Lindo y Gualanday. La longitud de este tramo por el eje del río es de aproximadamente 3.67 km. Ver figura 6-1.

Estas curvas tienen una resolución de 0.50 m, de tal forma que representan muy bien la geomorfología del terreno, para el modelado. Ver Figura 6-2.

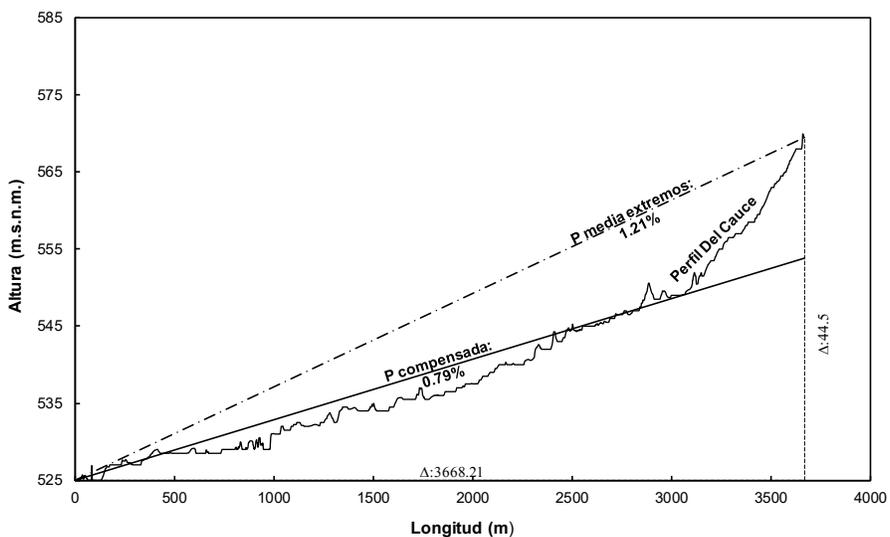


Figura 6-1. Perfil del cauce tramo de modelo

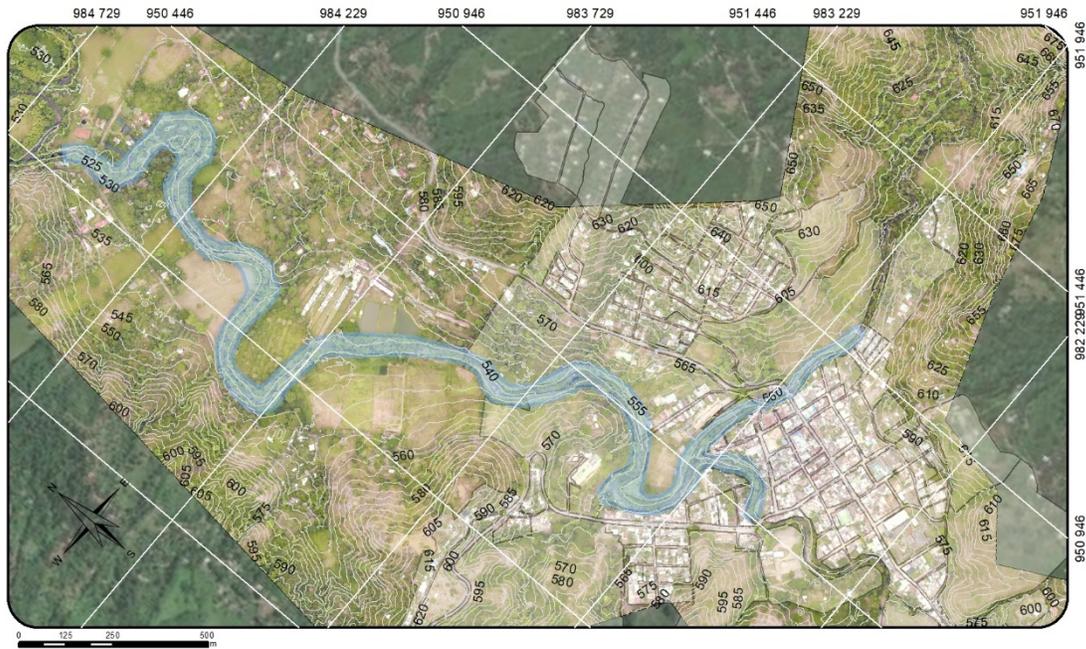


Figura 6-2 Curvas de nivel – Tramo modelo Río Lindo – Viotá

Mediante un proceso de transformación de formato vectorial (curvas de nivel) se pasa a formato ráster (matriz), donde se transforma para cada celda del ráster, el valor de la elevación que corresponda a la celda en el proceso de asignación. Ver figura 6-3. El método de asignación es la generación de triángulos a partir de los vértices de las líneas de las curvas de nivel y luego mallar, donde el centro de cada celda se asigna su coordenada X y, y la elevación es inferida a partir de la superficie del o los triángulos que caen dentro del área de la celda.

Durante el proceso, la herramienta permite configurar el tamaño de la celda, que para el caso del modelo a realizarse se tomó una celda de 1.0 m x 1.0 m, con el propósito de mantener la buena resolución de las curvas de nivel.

Otro elemento para tener en cuenta es la frontera o límite del ráster, para lo cual se determinó con una corrida previa y un ancho estimado de tal forma que el tamaño fuera el mínimo posible sin dejar áreas sin cubrir con el modelo.

Dada la buena resolución de las curvas de nivel, no hubo necesidad de realizar ajustes al ráster por falta de información o interpretaciones dudosas al transformar la información.

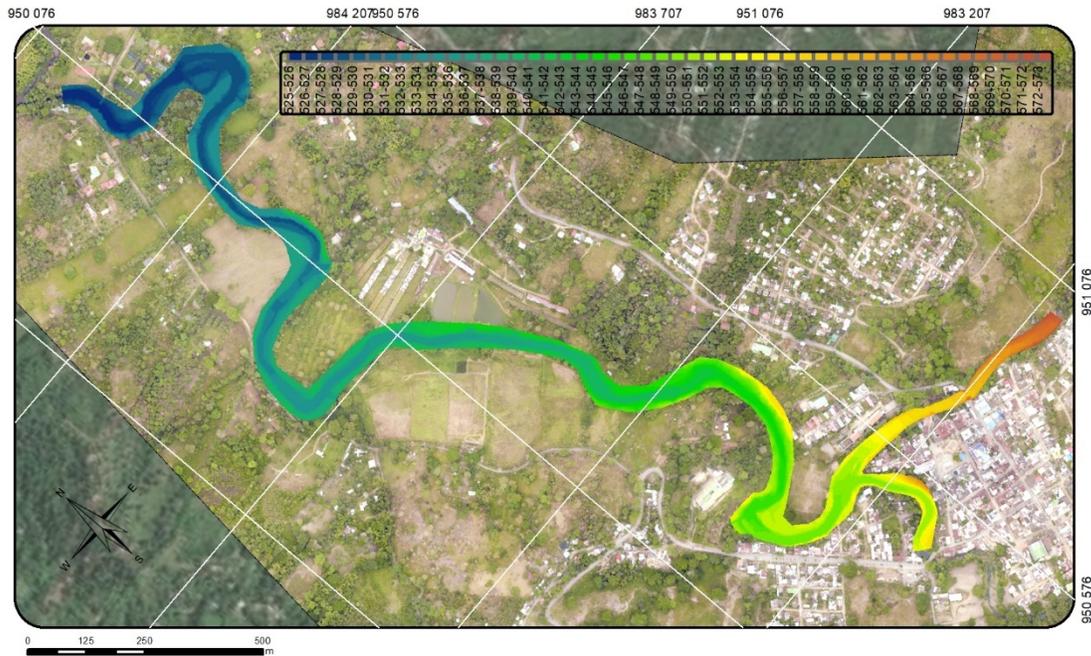


Figura 6-3. Imagen ráster de elevaciones – Modelo Río Lindo – Viotá.

6.4 Geometría del modelo

El programa IBER (V2.6), realiza la modelación a partir de elementos geométricos, denominados nodos y elementos, los nodos corresponden a los vértices de conectividad entre elementos, y por lo general, los elementos son polígonos regulares (triángulos o rectángulos) que están soportados por una topología de conectividad, (bordes, vértices y caras).

Una vez establecido el archivo ráster a utilizar en la definición del mallado, el programa IBER solicita tres parámetros para la dimensión y conectividad de los elementos. Estos parámetros son los lados de la malla (alto y ancho) y el otro es la distancia mínima de conectividad para la creación del elemento.

La definición de estos parámetros es de vital importancia, dado que en la medida se reduzca el lado del elemento, el número de elementos aumenta si se toma la mitad del tamaño inicial en una progresión geométrica al cuadrado, por consiguiente, el número de pasos que el programa debe resolver se aumenta en esta progresión. Es decir, si se aplica un 1.0 m de lado, y luego se redefine a un lado de 0.50 m, la conectividad se aumenta por 4, dado que se puede acomodar 4 elementos de 0.50 m dentro de uno de 1.0 m.

Para el modelo se realizaron pruebas previas de tiempo de modelados teniendo en cuenta la densidad de la malla, encontrándose que el lado óptimo para no perder resolución en los cálculos y la información de las curvas de nivel es una malla de lado de 1.0 m. y límite de conexión de 0.10 m, con estos parámetros la calidad del mallado es la siguiente:

Número de triángulos: 209377

Número de Nodos: 108960

La distribución por el lado mínimo es:

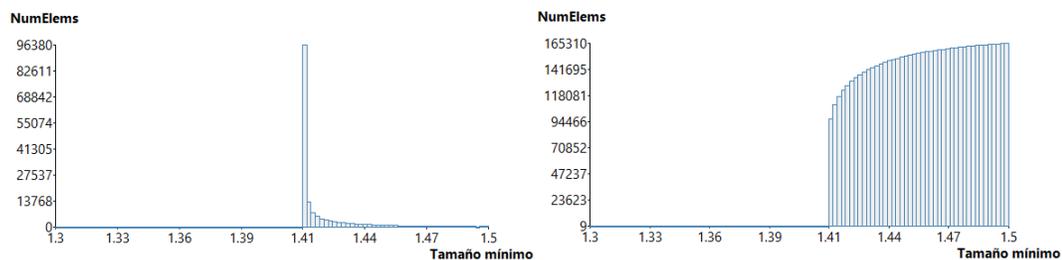


Figura 6-4. Distribución de mallado modelo río Lindo.

Evidenciando que un gran porcentaje de elementos tiene lado 1.0 m es decir la diagonal es 1.41 m.

A continuación se presenta el resultado del mallado:

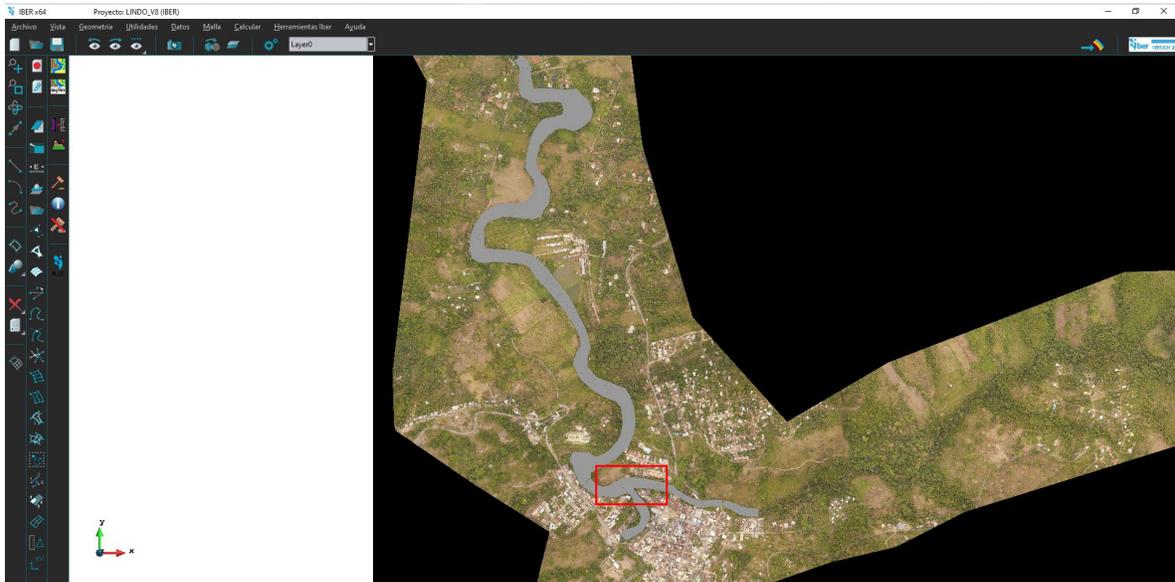


Figura 6-5. Malla de elementos para modelo Río Lindo – Viotá



Figura 6-6. Detalle del mallado generado

6.5 Condiciones de frontera.

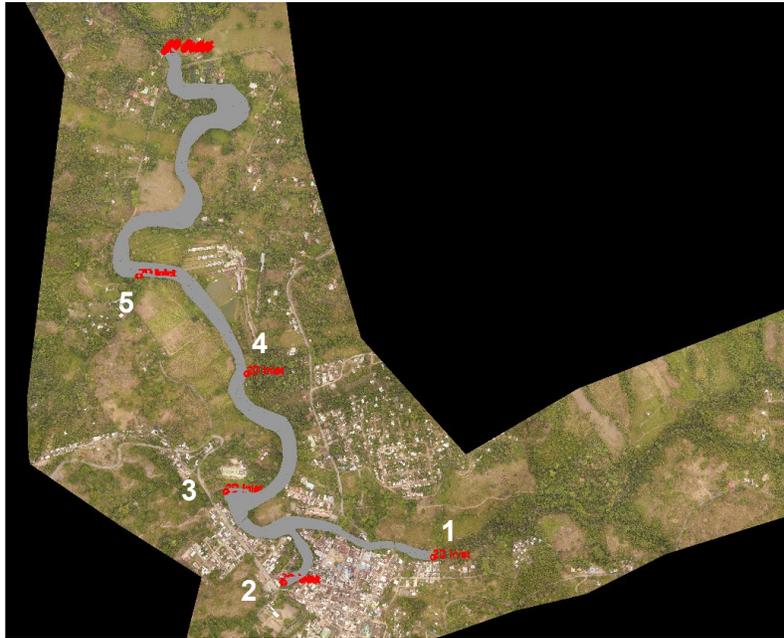
El programa IBER requiere definir las condiciones de frontera, que para el caso del componente hidráulico, corresponde a las entradas de caudal y las salidas del caudal.

Para ello se utilizó la información del numeral 5.2, donde mediante los aforos realizados se establecieron los caudales de entrada para el modelo:

Tabla 6-1. Caudales de entrada modelo IBER

Entrada	Parámetro	Valor	Entrada
1	Caudal	0.087 m ³ /s	Río Lindo Sección 1-1
2	Caudal	0.147 m ³ /s	Quebrada La Pilama
3	Caudal	0.151 m ³ /s	Q. La Sirena
4	Caudal	0.051 m ³ /s	Aguas abajo zona piscina
5	Caudal	0.051 m ³ /s	Aguas arriba de la PTAR proyectada
Total		0.486 m³/s	Medido en campo

Fuente: elaboración propia



Río Lindo Sección 1-1



Quebrada La Pilama



Entrada lateral aguas abajo confluencia



Entrada lateral aguas abajo de zona piscina



Entrada lateral aguas arriba PTAR



Condición de salida

Figura 6-7. Detalle de asignación de entradas de caudal

6.6 Coeficiente de Manning

De acuerdo con lo establecido en el numeral 5.8, se definió un número de Manning de 1.487, valor que se usara de referencia inicial para todo el mallado, más sin embargo para las condiciones de las corrientes de agua involucradas, se establecieron tres zonas de diferenciación para lograr la calibración del modelo en su componente hidráulico. En la figura 6-8 se presenta el límite de las zonas asignadas para el Manning.

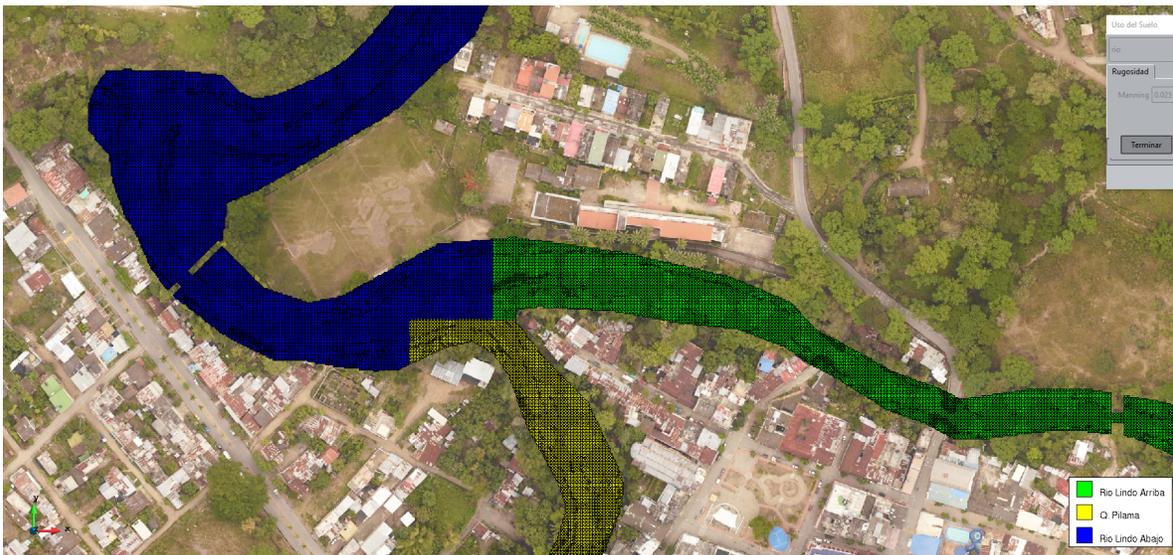
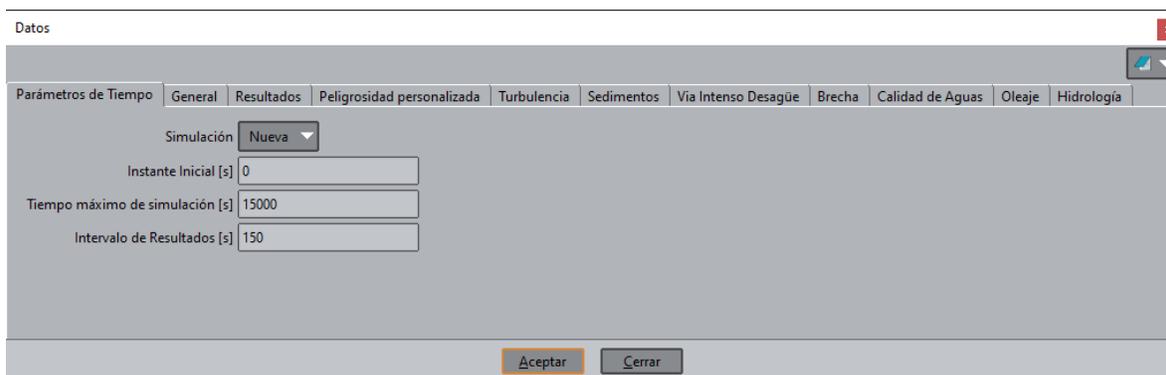


Figura 6-8. Asignación de zonas para el coeficiente de Manning

6.7 Configuración inicial de parámetros del modelo

IBER utiliza una asignación de parámetros de corrida en un modelo de asignación general, de forma muy intuitiva se puede acceder y realizar los ajustes que se requieran. A continuación se presentan los parámetros considerados para el modelo hidráulico:

6.7.1 Parámetro de tiempo



The image shows a software interface window titled "Datos". It has a tabbed menu with the following tabs: "Parámetros de Tiempo", "General", "Resultados", "Peligrosidad personalizada", "Turbulencia", "Sedimentos", "Via Intenso Desagüe", "Brecha", "Calidad de Aguas", "Oleaje", and "Hidrología". The "Parámetros de Tiempo" tab is selected. Inside this tab, there is a "Simulación" dropdown menu set to "Nueva". Below it are three input fields: "Instante Inicial [s]" with the value "0", "Tiempo máximo de simulación [s]" with the value "15000", and "Intervalo de Resultados [s]" with the value "150". At the bottom of the window, there are two buttons: "Aceptar" and "Cerrar".

Figura 6-9. Parámetros de tiempo corrida modelo hidráulico

La corrida esta para un total de 30000 segundos, definido con las corridas preliminares para establecer que se alcanza un flujo completamente desarrollado a los 15000 segundos. (Caso hidrodinámico).

El parámetro de "Intervalo de resultados" corresponde la resolución de la salida de los datos, para el caso y no cargar tanto la memoria, se estableció una ventana de 150 segundos. (Caso hidrodinámico)

6.7.2 Parámetros Generales

Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Peligrosidad personalizada | Turbulencia | Sedimentos | Via Intenso Desagüe | Brecha | Calidad de Aguas | Oleaje | Hidrología

Análisis 2D

Número de procesadores: 12

Esquema Numérico: Primer Orden[Rápido]

CFL: 0.45

Incremento de tiempo máximo [s]: 1

Limite Seco-Mojado [m]: 0.01

Método de Secado: Por Defecto

Opciones generales: Mostrar

Condicion de Courant Estricta: Desa

Fricción en las paredes: Coeficiente de Mannin

Manning pared: 3.51

Viscosidad molecular [m²/s]: 0.000001

Presión Baroclínica

Coriolis

Latitud (grados): 4.4

Llenar depresiones

Detalles de Simulación

Aceptar Cerrar

Figura 6-10. Parámetros generales modelo hidráulico

Se utiliza el máximo de núcleos del procesador disponible, que en este caso serán 12, correspondientes a un procesador utilizado de Intel(R) Core (TM) i7-9750H CPU @ 2.60 GHz, de 6 núcleos físicos y 12 virtualizados, 32 GB RAM asignada dedicada al modelo, tarjeta de video NVIDIA GTX1660 de 4GB con 1024 núcleos CUDA y ancho de banda de flujo de datos de 128 GB/s.

El esquema número se toma de primer orden

CFL: Número de Courant - Friedrich – Lewy, número a tenerse en cuenta para la resolución de los pasos de la ecuación de Saint Venant. Debe ser menor a uno.

Incremento de tiempo máximo: se toma 1 segundo, para permitir que los saltos puedan darse por arriba o por abajo, números mayores a 5 segundos puede darse inestabilidades en la resolución, va de la mano con el tamaño del mallado, dado que se conoce que las velocidades en el modelo deben ser bajas, se recomienda utilizar el techo de 1 segundo para la estabilidad del cálculo.

Límite líquido – seco, se toma el valor de defecto que es de un centímetro, este parámetro es tenido en cuenta para cuando se detecta zonas límites de condición húmeda y se establezca un límite de cálculo, conlleva a que optimiza el número de pasos para no generar cálculos en toda la malla, si no en aquellos donde efectivamente se tiene límite líquido.

Método de secado: Aplica para cuando las condiciones de modelación tienen en cuenta condiciones hidrológicas (precipitación, infiltración, tránsito).

Otras opciones generales:

Condición de Courant estricta, se deshabilita para poder habilitar el cálculo en paralelo para mejorar el rendimiento de resolución de los pasos.

Fricción en la paredes, se establece un valor de Manning alto para los casos cuando existen estructuras intermedias que puedan afectar las condiciones de contorno, para el caso de ríos no afecta el cálculo, dado que cada elemento del mallado tiene su propio valor de Manning.

Viscosidad molecular, este valor es tenido en cuenta en la solución de la ecuación de difusión de una variable o parámetro de calidad, se toma el valor para agua a 23°C.

Coriolis, se activa para determinar los efectos gravitatorios en la resolución de la conservación de energía, el programa asigna automáticamente las constantes en función de la latitud donde se encuentre el modelo.

6.7.3 Turbulencia

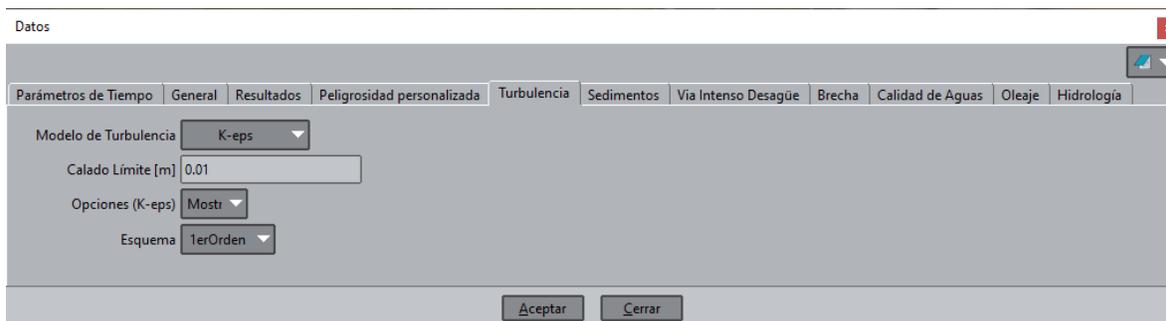


Figura 6-11 Parámetros de turbulencia, modelo hidráulico

Se activa el parámetro de turbulencia (tiene en cuenta efectos de Coriolis), es decir los efectos rotacionales del flujo. Se toma el valor de defecto de un centímetro para que tenga en cuenta los efectos de turbulencia, y el método de resolución será de primer orden, que es lo recomendado para ríos.

6.8 Calibración hidráulica.

Se define la calibración para la condición de la lámina de agua en el sitio conocido como PTAR, donde es la sección más agua bajo de control que se tiene en el modelo, adicional, será la sección de control calidad cuando se aplique la condición de entrada en servicio de la PTAR.

Dado que las condiciones de flujo para el modelo se identificaron tres grandes zonas, se procedió a realizar diferentes corridas, para determinar los valores del coeficiente de Manning que satisfacen la condición de lámina de agua en la sección de control.

Adicional para la quebrada La Pilama, también se hace el ajuste comuna sección de control (Sección 4-4), antes de su confluencia con el río Lindo.

6.8.1 Sección 5-5 – PTAR

De acuerdo con la tabla 5-10 se tiene una lámina de agua media de 0.40 m, a continuación se presentan los diferentes valores asignados del coeficiente de Manning para el tramo denominado Río Lindo Abajo:

El primer paso era acotar el tiempo de simulación para aquella condición donde se establecía la condición estable de la lámina de agua. Ver figura 9.8. Se encontró que a los 21000 segundos la lámina se vuelve estable, por lo tanto la corridas para variar el Manning será hasta los 21000 segundos.

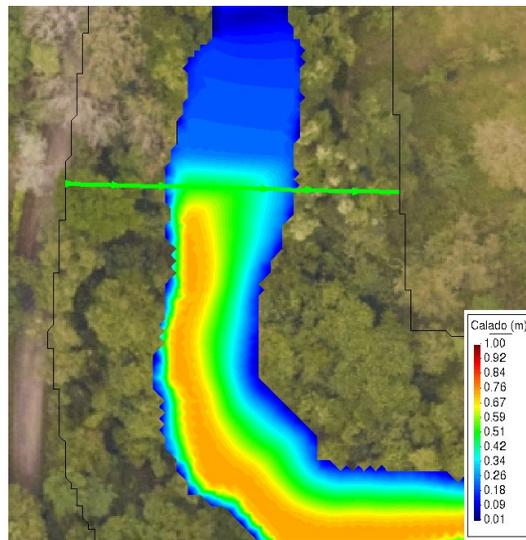


Figura 6-12. Evolución Profundidad [m] en [949837.9, 983801, 534.35] Sección 5-5

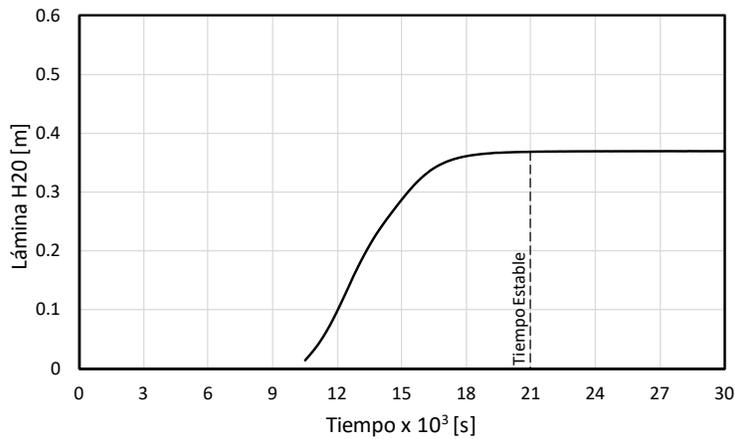
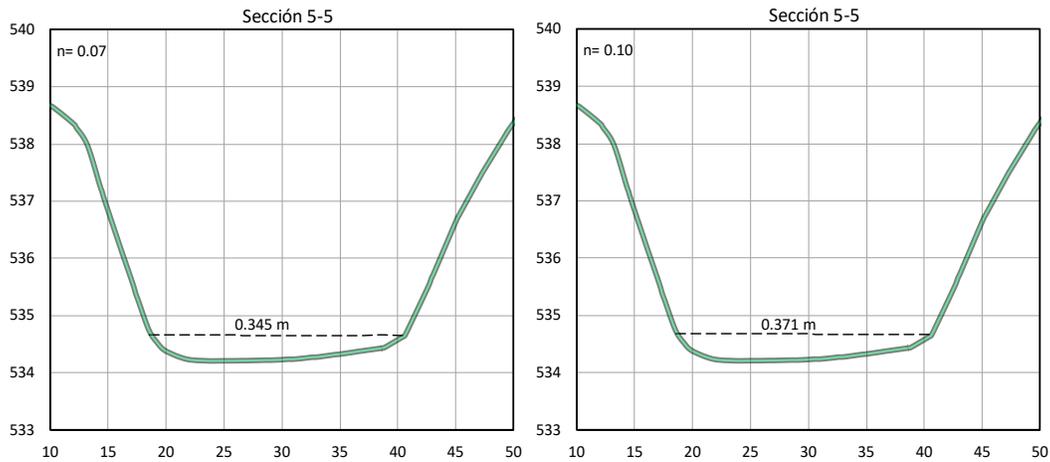


Figura 6-13. Evolución Profundidad [m] en [949837.9, 983801, 534.35] Sección 5-5

Acotado este tiempo, se procede a realizar las distintas corridas haciendo la variación del coeficiente de Manning y revisando que valor de la profundidad promedio de la sección evaluada es igual o parecida a la altura media obtenida en la sección levantada de campo (Ver tabla 5-10). Se presentan a continuación los resultados de estas corridas:



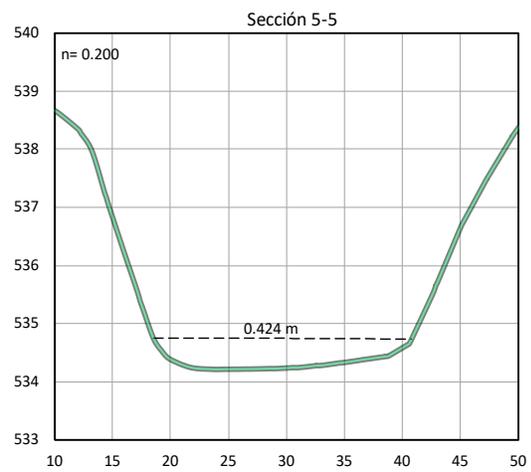
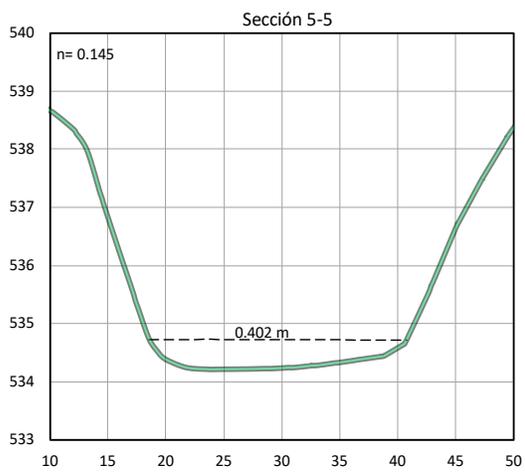
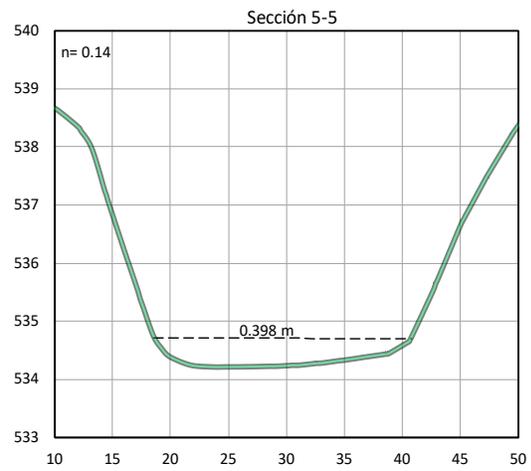
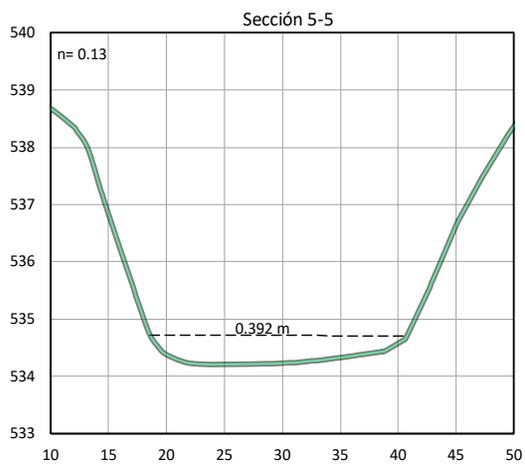


Figura 6-14. Sección 5-5 Evolución coeficiente Manning

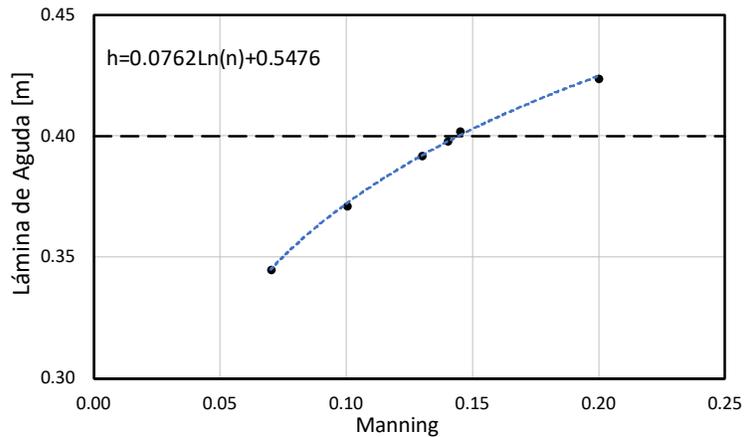


Figura 6-15. Correlación Manning – Lámina de agua – Río Lindo Sección 5-5

De lo anterior se encontró que el valor del coeficiente de Manning que hace que converja la lámina de agua al valor de 0.40 m es de 0.145. También se ajustan los datos a una ecuación tipo logarítmica con un R^2 de 0.998.

Valor muy por debajo del valor calculado en la sección 5.8, esto se debe que el factor de longitud de viaje realmente impacte en el desarrollo de las corrientes de flujo, por lo tanto si se aplicara el valor inicial de Manning de 1.487, conduciría a una lámina de agua muy superior a la condición encontrada en campo.

De igual manera el valor medio de la velocidad en la sección es de 0.054 m/s Ver figura 6-16.

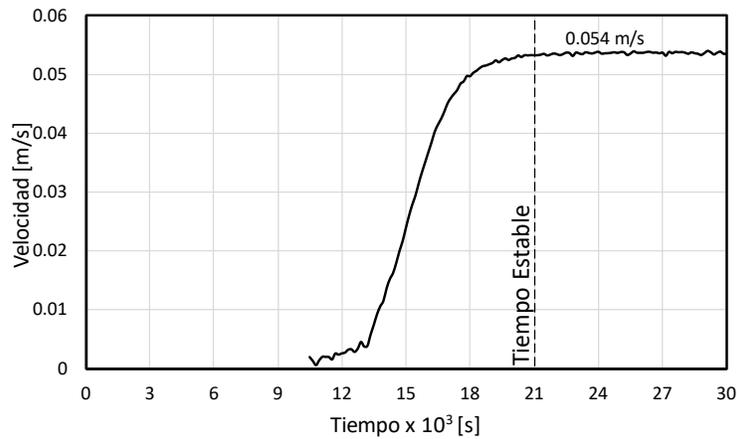


Figura 6-16 Evolución Velocidad [m/s] en [949837.9, 983801, 534.35] Sección 5-5

6.8.2 Sección 4-4 – Q. Pilama

De acuerdo con la tabla 5-9 se tiene una lámina de agua media de 0.29 m, a continuación se presentan los diferentes valores asignados del coeficiente de Manning para el tramo denominado Quebrada La Pilama:

El primer paso era acotar el tiempo de simulación para aquella condición donde se establecía la condición estable de la lámina de agua. Ver figura 6-17.

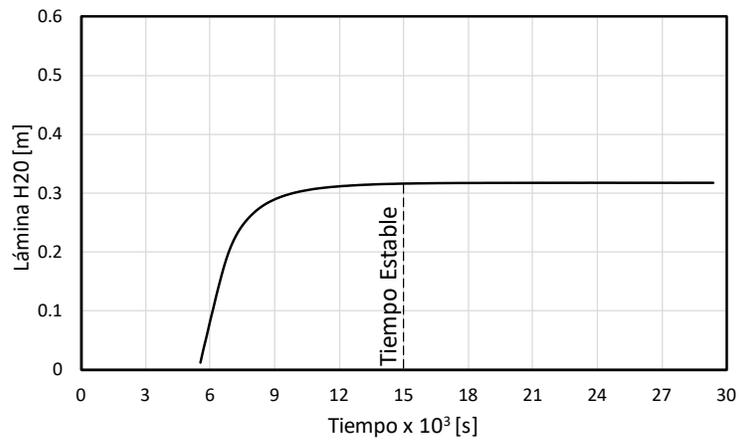
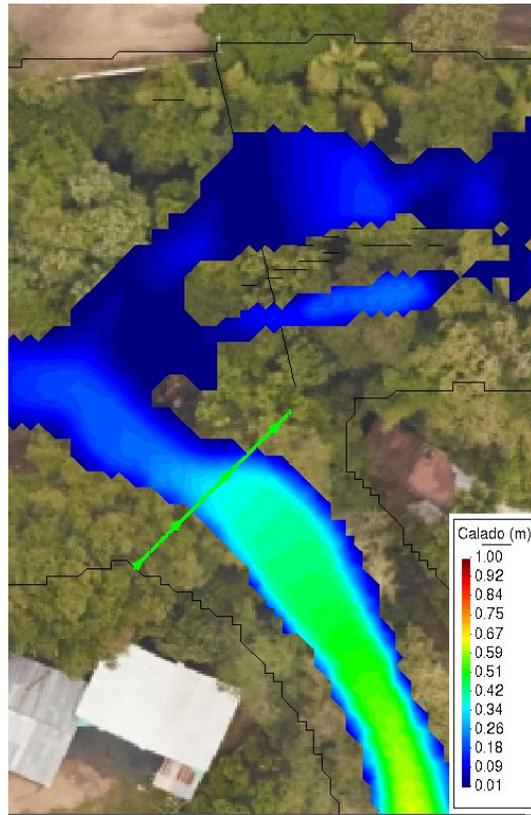
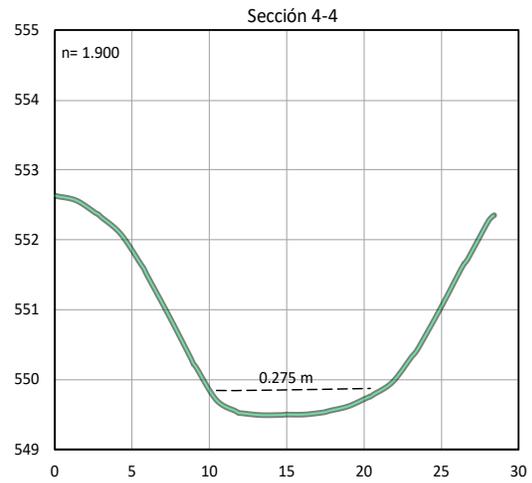
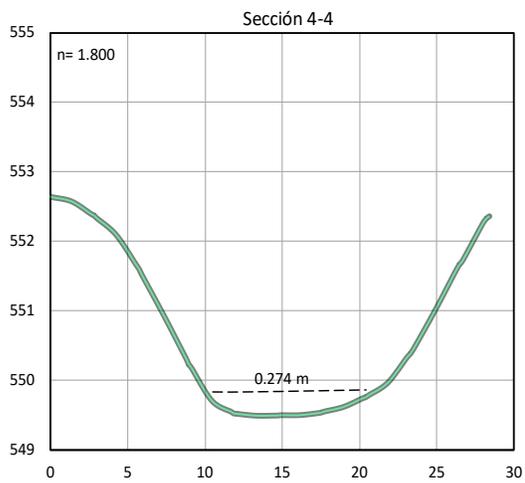
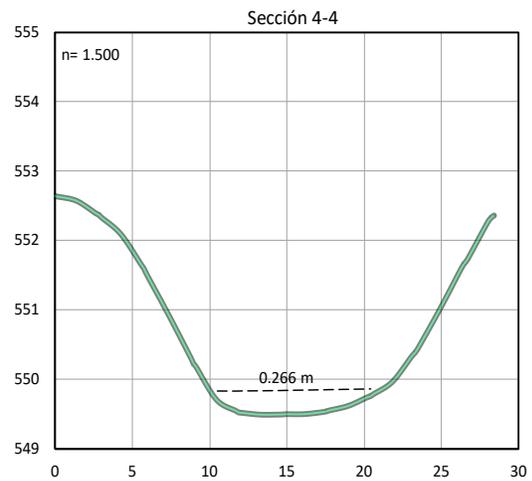
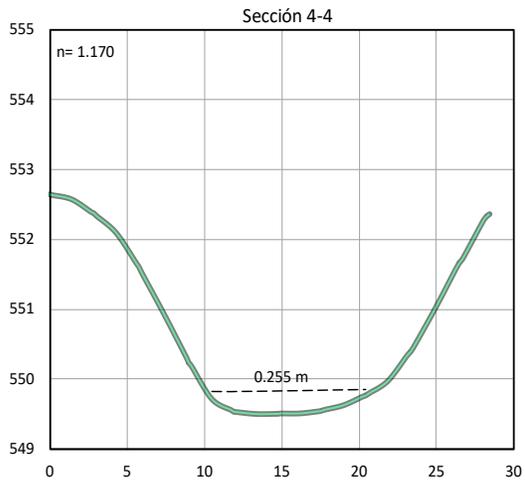


Figura 6-17. Evolución Profundidad [m] en [950472,982756,549.5] Sección 4-4

Acotado este tiempo, se procede a realizar las distintas corridas haciendo la variación del coeficiente de Manning y revisando que valor de la profundidad promedio de la sección evaluada es igual o parecida a la altura media obtenida en la sección levantada de campo (Ver tabla 5-9). Se presentan a continuación los resultados de estas corridas:



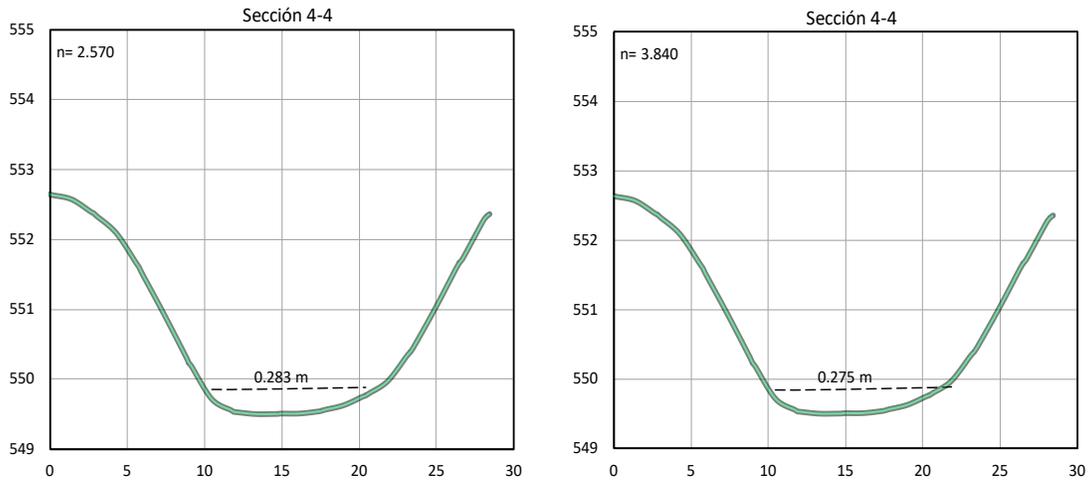


Figura 6-18. Sección 4-4 Evolución coeficiente Manning

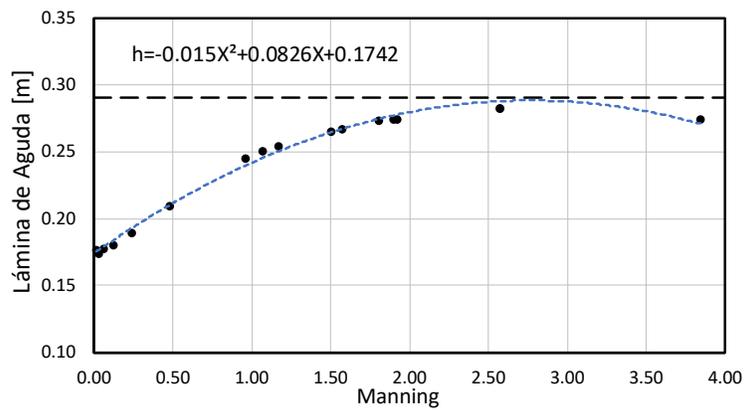


Figura 6-19. Sección 5-5 Evolución coeficiente Manning

De acuerdo con los resultados, no se logra llegar a la lámina media, medida en campo de 0.29 m, se logró alcanzar un valor de 0.283 m para un Manning de 2.57, aplicando la derivada a la ecuación de ajuste y encontrando el máximo de la función, se encontró que el valor de Manning que maximiza es de 2.762, para lo cual al realizar la corrida con este

valor para el tramo de la quebrada Pilama, arroja una lámina de 0.289, valor aceptable para la lámina

De igual manera el valor medio de la velocidad en la sección es de 0.020 m/s para el Manning de 2.762, Ver figura 6-19 y 6-20.

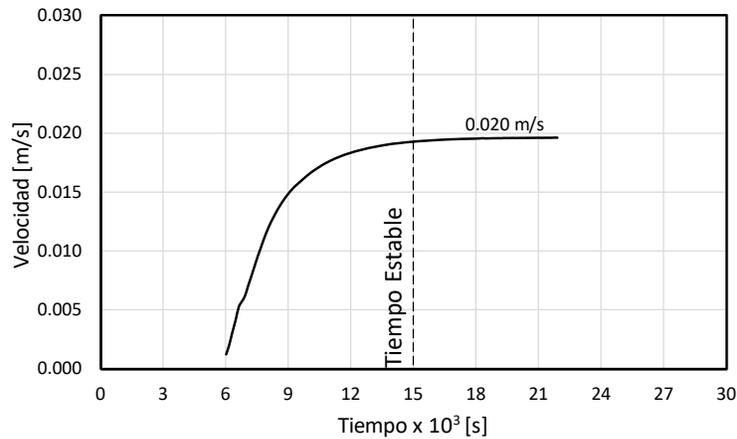


Figura 6-20 Evolución Velocidad [m/s] en [950472,982756,549.5] Sección 4-4 caso n=2.762

6.8.3 Sección 2-2 – Río Lindo arriba

Para la zona del río Lindo de la parte desde la piscina (sección 1-1) hasta la confluencia con la quebrada Pilama, se mantuvo el valor del Manning calculado en el 5.8, arrojando una lámina de 0.18 m, y una velocidad, de 0.025

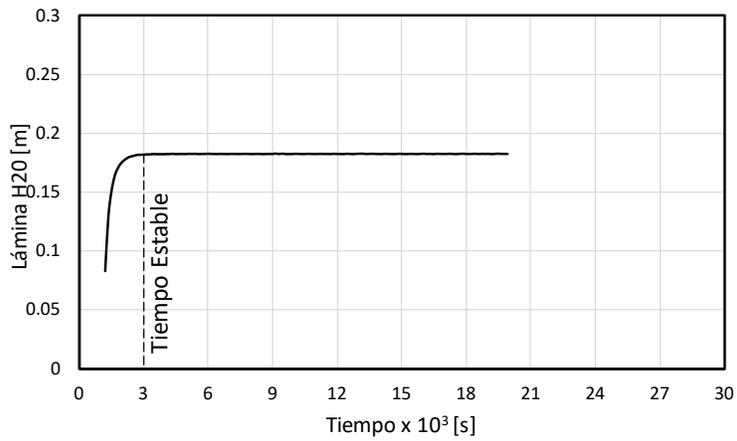


Figura 6-21. Evolución Profundidad [m] en [950879,982699,563.5] Sección 2-2

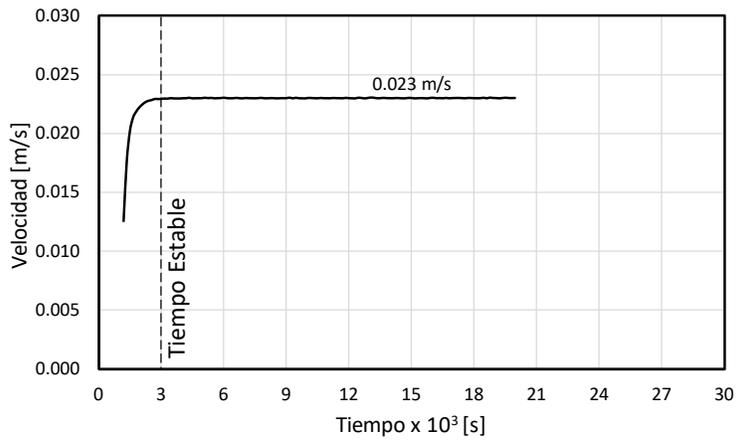


Figura 6-22 Evolución Velocidad [m/s] en [950879,982699,563.5] Sección 2-2

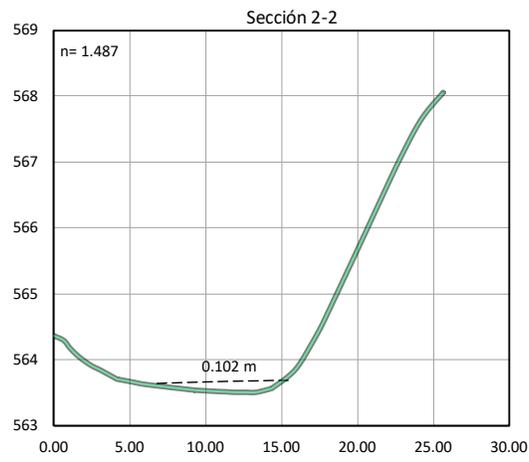


Figura 6-23. Sección 2-2

6.9 Resumen de resultados

Se tiene los siguientes resultados:

Tabla 6-2. Resultados de lámina modelo hidráulico

Entrada	Manning	Lámina Calculada [m]	Lamina Medida [m]
Río Lindo Sección 2-2	1.487	0.180	0.462
Río Lindo Sección 5-5	0.145	0.402	0.400
Quebrada La Pilama	2.762	0.289	0.290

Elaboración propia

Con estos valores, se entra a realizar la calibración del modelo de calidad.

7 Modelación: componente calidad

El objetivo de calibrar desde el punto de vista de un parámetro de calidad es determinar, entre otras variables, los coeficientes de difusión y el número de Schmidt del constituyente a modelar. De acuerdo con el modelo de transporte utilizado por IBER, se requiere de dos parámetros de entrada el coeficiente de difusión (para transporte difuso y disperso) y el número de Schmidt que relaciona el coeficiente de difusión turbulenta de momento y el coeficiente de difusión turbulenta de la variable considerada.

Teniendo fijo el componente hidráulico, representado por el coeficiente de Manning, se inician las diferentes corridas para determinar los coeficientes que mejor ajusten los valores medidos en campo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en campo (ver 5.6 y 5.7), el parámetro utilizado como trazador principal es la sal (NaCl), para el tramo correspondiente al tramo Río Lindo Arriba se obtuvieron picos en el punto de control 2 del orden de 226 mg/L y de 147 mg/L en el punto de control 3, para el tramo Río Lindo abajo, se obtuvieron respectivamente 416 mg/L en el punto 5 y de 67 mg/L en el punto 7 (Ver Figura 5-3).

Con el análisis másico presentado en 5.7, para el tramo 2-3 se obtuvieron valores base de coeficientes de dispersión longitudinal de 0.27 m²/s y de 0.10 m²/s para el tramo 5-6, correspondientes respectivamente al Río Lindo arriba y al Río Lindo abajo.

Se inicia con un número de Schmitt de 0.7, que es el valor por defecto del software, la metodología radica en realizar diferentes corridas, variando el coeficiente de dispersión, de tal forma que se observe que tanto se ajusta el valor pico del trazador en la sección de control, de igual forma se varía el coeficiente Schmidt para ver como incide en los resultados.

Por otras parte, dada las condiciones de contorno aplicadas, es decir un acercamiento en la superficie del cauce mediante una interpretación de modelado por archivo ráster, las características propias del cauce como son la forma y tamaño de las rocas, no son aplicadas al modelo, por lo tanto los tiempos de viaje variarían con respecto a lo leído, por

lo tanto se asume que la calibración será para el evento en donde se logre maximar el tiempo de viaje y el valor del pico del trazador.

7.1 Desarrollo del modelo de calidad del agua

Como se mencionó con anterioridad para poder aplicar el trazador o soluto en el modelo, se debe definir una sección de entrada al modelo, de tal forma que se garantice que hay lámina de agua, de otra forma el programa realizará cálculos nulos sobre el modelo de calidad. Para lo anterior se ajustó el mallado del cauce para garantizar que el soluto va a estar en contacto con el agua.



Figura 7-1 Ajuste del mallado para tramo Sección 2-2 a Sección 3-3



Figura 7-2 Ajuste del mallado para tramo Sección 5-5 a Sección 5-5

Adicional se aplicó en una ventana de tiempo para cada sección de aplicación del soluto garantizando estabilidad en la lámina de agua para cada una de las secciones de control. En las figuras 5-13 y 5-14 se presentan los tiempos de recorrido del soluto entre las respectivas secciones a modelar y en la tabla 10-1 se incluyen los valores picos de referencia a modelar para la calibración.

Tabla 7-1 Datos medidos trazador en campo.

Sección	T ₀ [s]	T _{pico} medido [s]	Pico NaCl [mg/L]
2-2	7000	8650	226.0
3-3		10045	146.6
5-5	11000	16000	384.6
6-6		18200	63.8

7.2 Calibración

Se realizaron las corridas necesarias para realizar por lo menos cuatro puntos de picos, con cuatro estados del número de Schmidt, creando cuatro grupos de la siguiente forma:

Tabla 7-2 Grupo de valores coeficientes de difusión y número de Schmidt

Grupo	Coficiente Difusión	Número de Schmidt
A	0.30	0.1
	0.20	
	0.10	
	0.05	
B	0.30	0.5
	0.20	
	0.10	
	0.05	
C	0.27	0.7
	0.20	
	0.10	
	0.05	
D	0.30	1.0
	0.20	
	0.10	
	0.05	

La salida de resultados se divide para el tramo 2-2 a 3-3 (Ver figura 5.3) correspondiente al tramo Río Lindo Arriba y el tramo 5-5 a 6-6 (Ver figura 5.3) correspondiente al tramo Río Lindo Abajo

7.2.1 Grupo A Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.1

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 2-2 a 3-3, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 0.1.

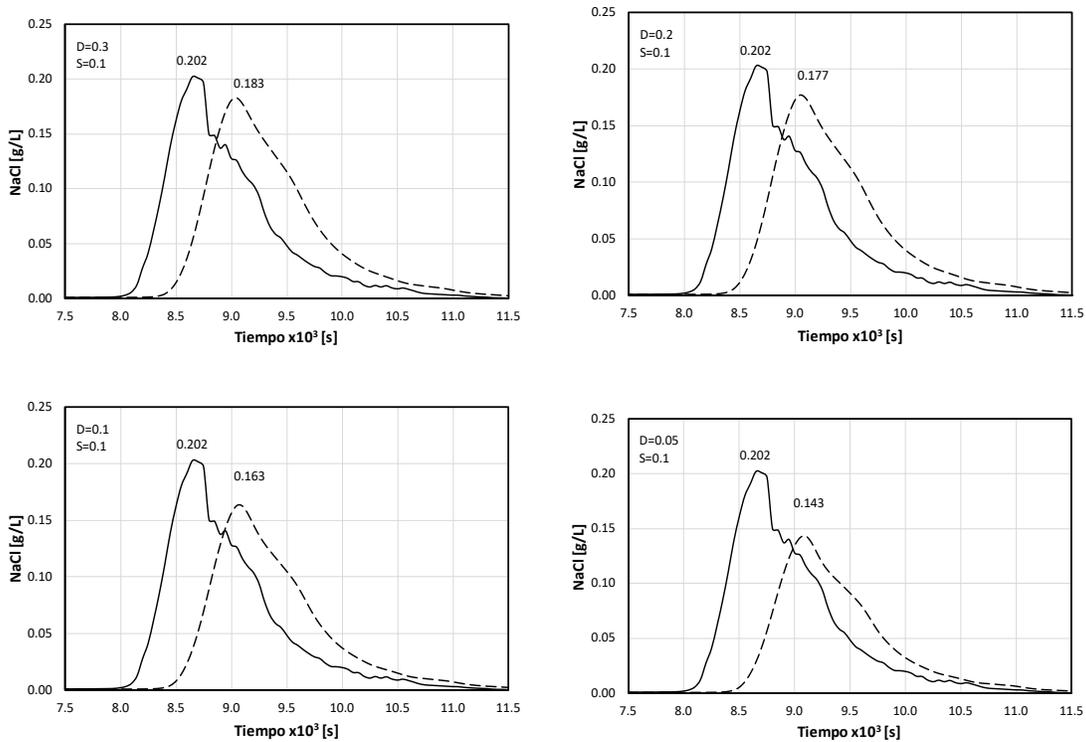


Figura 7-3 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Arriba. Schmidt=0.1

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

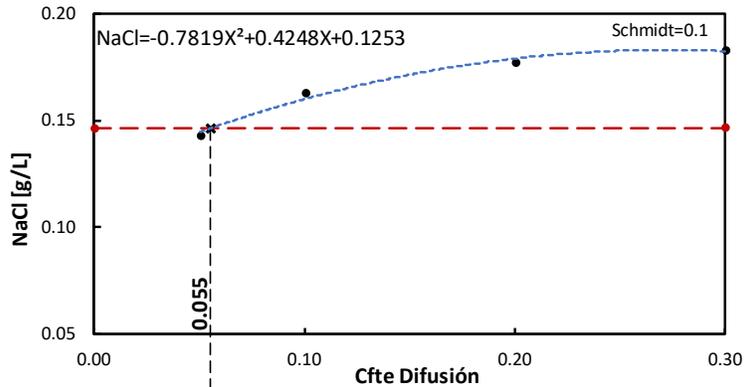


Figura 7-4 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Arriba.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de 0.042.

7.2.2 Grupo B Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.5

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NACL) para el tramo 2-2 a 3-3, donde se gráfica las concentraciones de NACL en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 0.5.

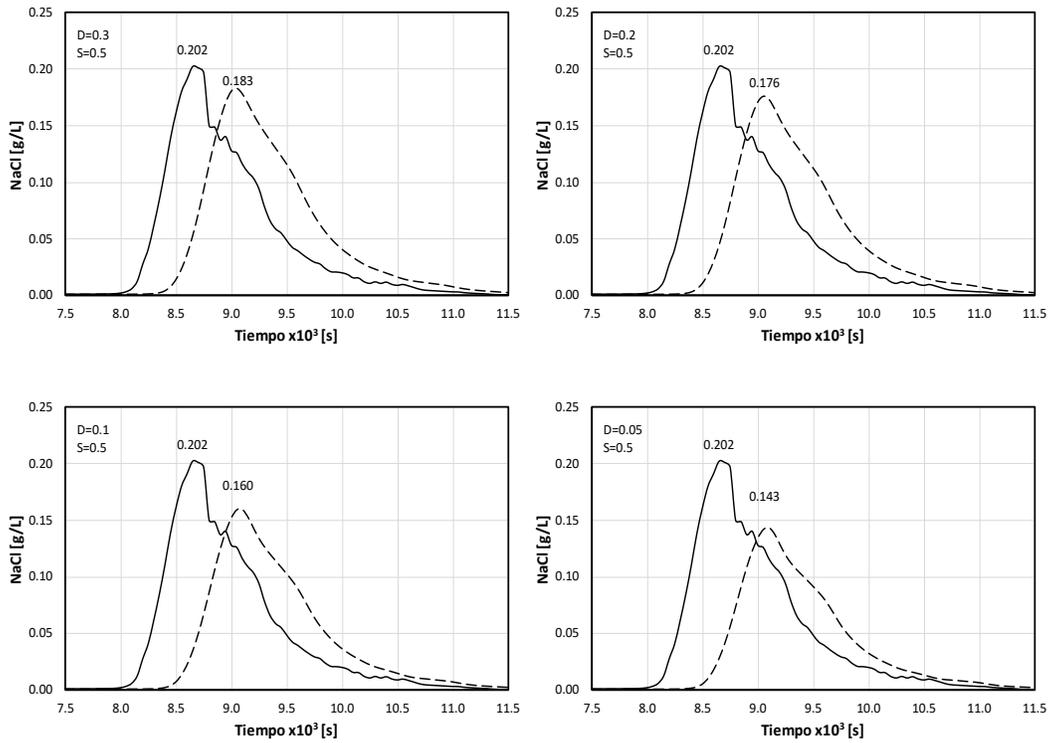


Figura 7-5 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Arriba. Schmidt=0.5

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

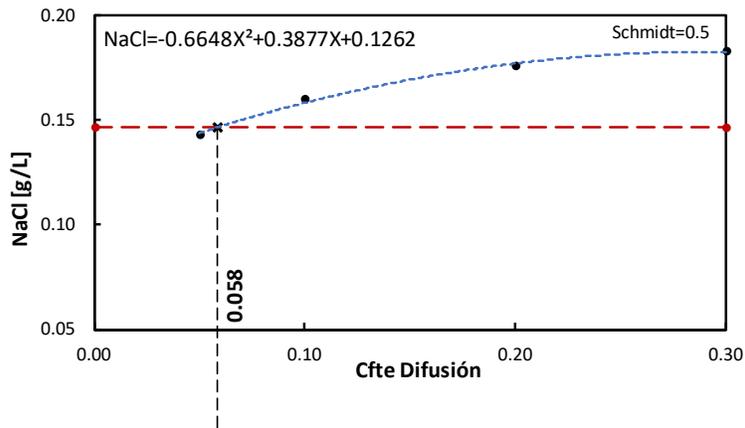


Figura 7-6 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Arriba.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de 0.058

7.2.3 Grupo C Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 0.7

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 2-2 a 3-3, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos, para un número de Schmidt igual a 0.7.

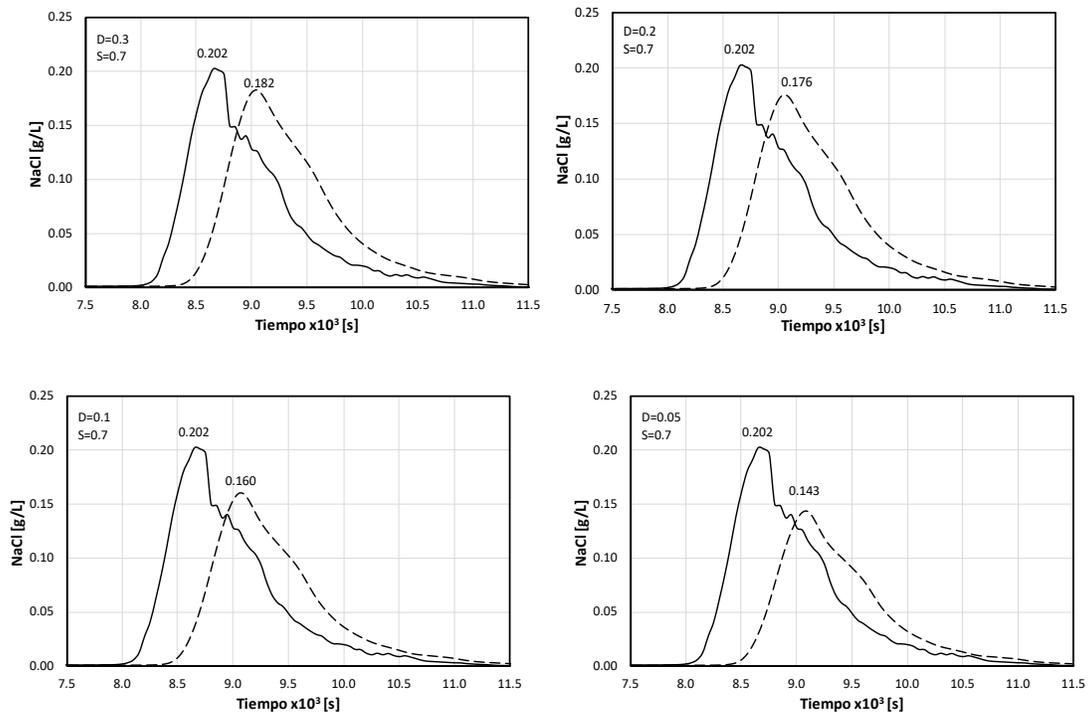


Figura 7-7 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Arriba. Schmidt=0.7

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión adoptado:

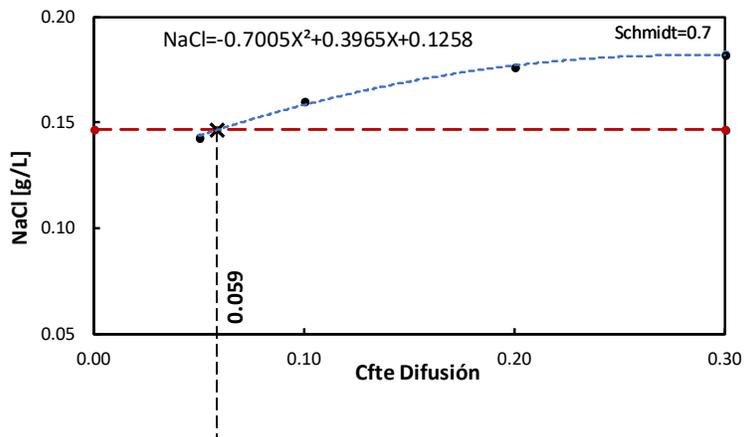


Figura 7-8 NaCl pico vs cte. de difusión – Tramo Río Lindo Arriba. Schmidt = 0.7

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de 0.059.

7.2.4 Grupo D Tramo 2-2 a 3-3 – Schmidt = 1.0

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 2-2 a 3-3, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 1.0.

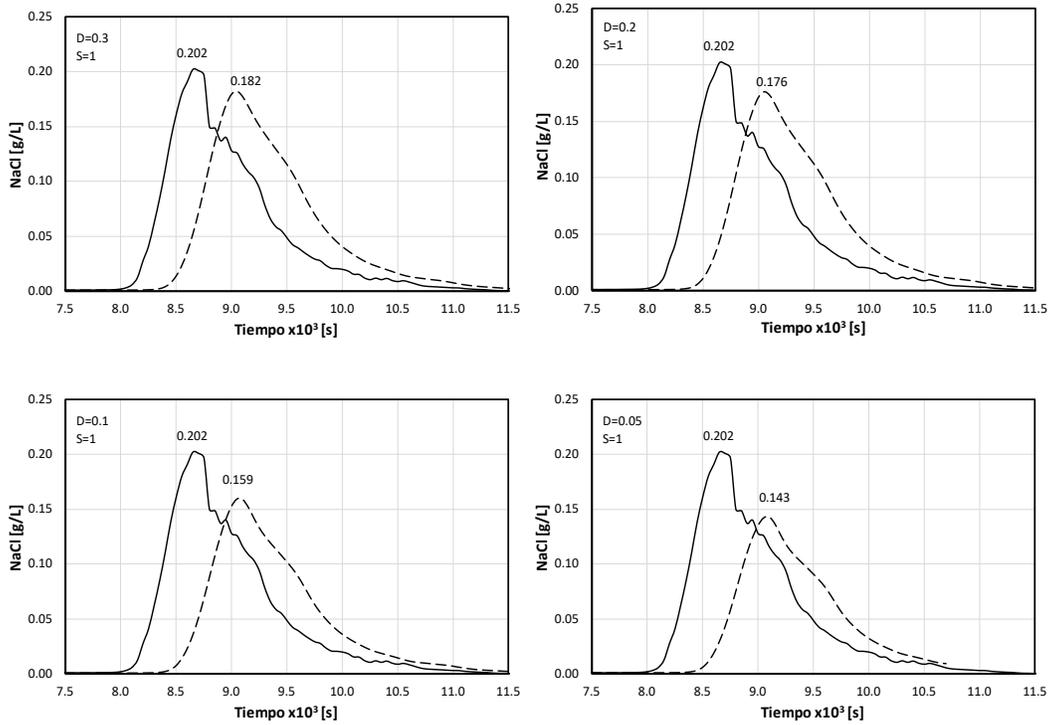


Figura 7-9 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Abajo. Schmidt=1.0

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

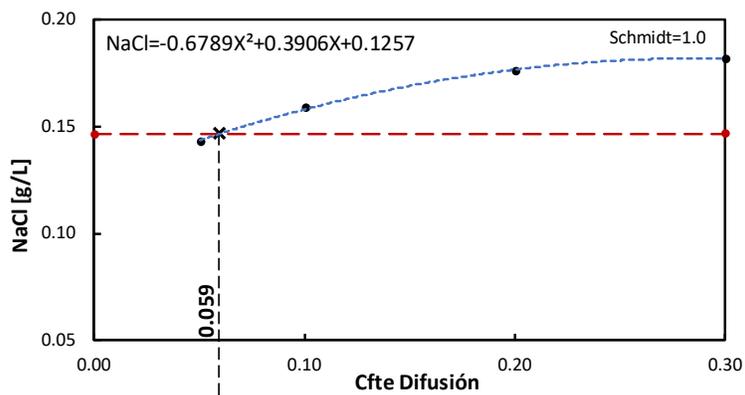
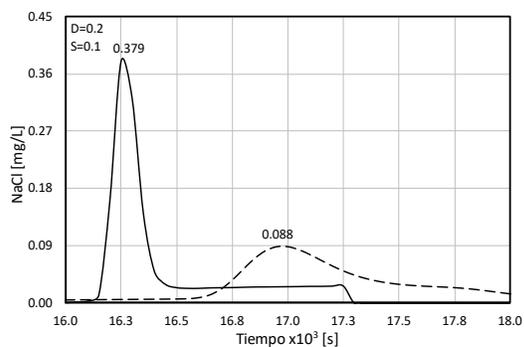
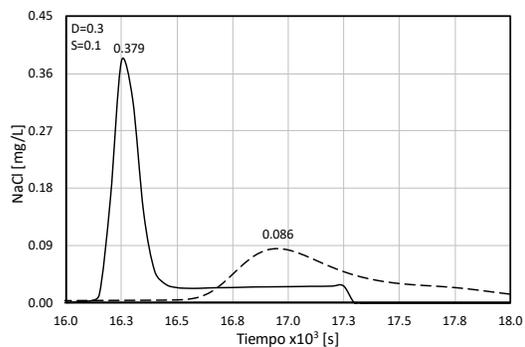


Figura 7-10 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Abajo.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de 0.059.

7.2.5 Grupo A Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.1

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 5-5 a 6-6, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 0.1.



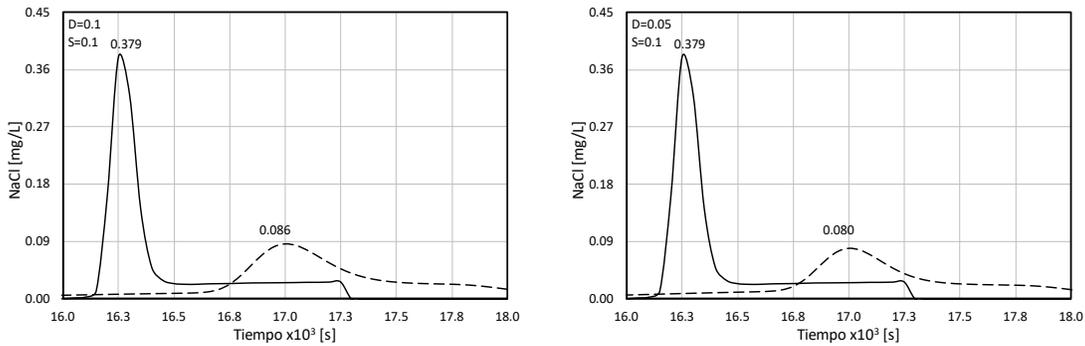


Figura 7-11 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Abajo. Schmidt=0.1

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

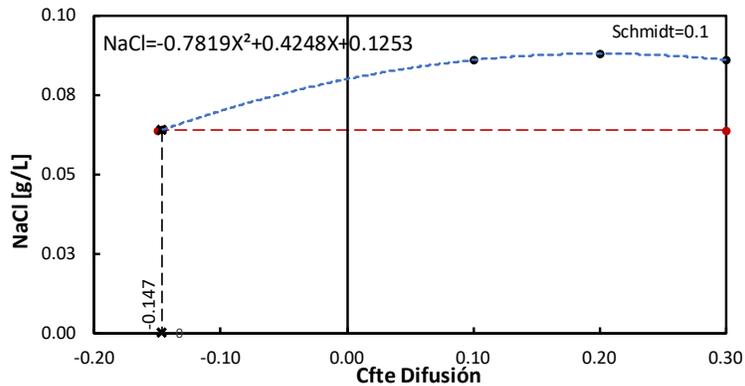


Figura 7-12 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Abajo.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de -0.147, valor que físicamente no es posible, .analizando la curva se obtiene un máximo en 0.200, para lo cual el valor de NaCl sería de 0.088 g/L, valor muy por encima del esperado de 0.063 g/L medidos en campo, la otra raíz para que

diera el valor medido en campo es de 0.543, valor por encima de los 0.10 estimados inicialmente con los datos de campo.

7.2.6 Grupo B Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.5

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 5-5 a 6-6, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 0.5.

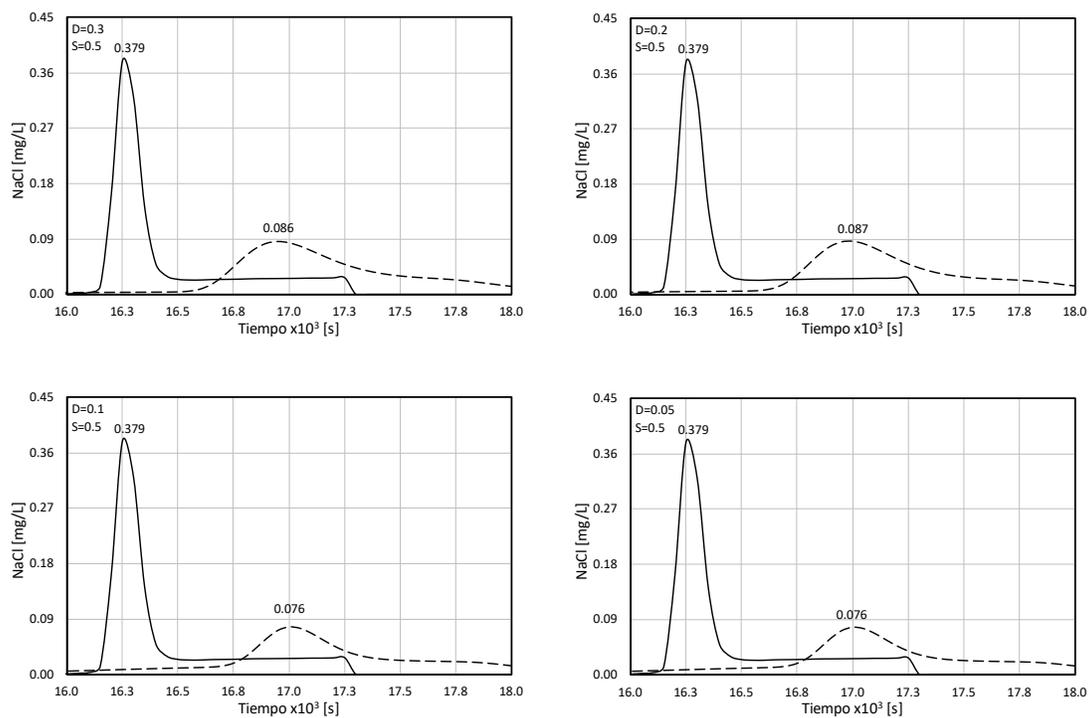


Figura 7-13 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Abajo. Schmidt=0.5

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

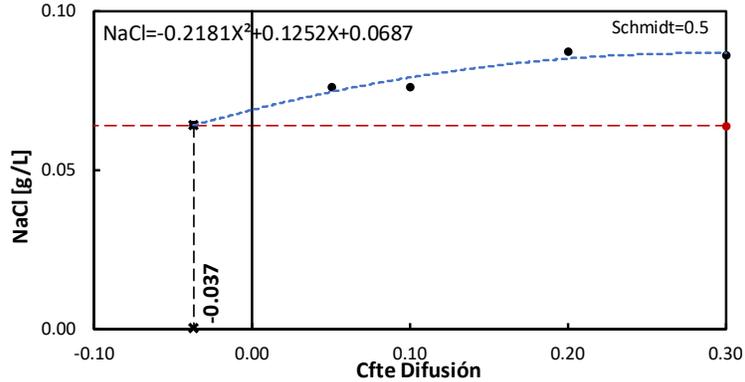


Figura 7-14 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Abajo.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de -0.037, valor que físicamente no es posible, .analizando la curva se obtiene un máximo en 0.287, para lo cual el valor de NaCl sería de 0.087 g/L, valor muy por encima del esperado de 0.063 g/L medidos en campo, la otra raíz para que diera el valor medido en campo es de 0.608, valor por encima de los 0.10 estimados inicialmente con los datos de campo.

7.2.7 Grupo C Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 0.7

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 5-5 a 6-6, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos, para un número de Schmidt igual a 0.7.

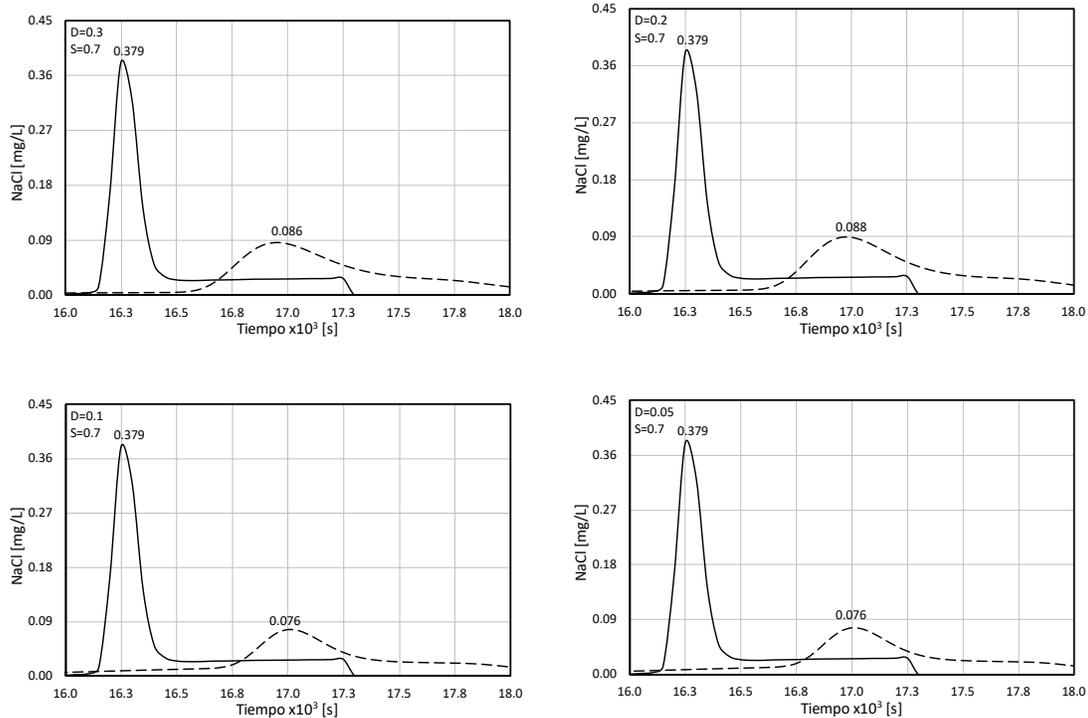


Figura 7-15 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Abajo. Schmidt=0.7

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión adoptado:

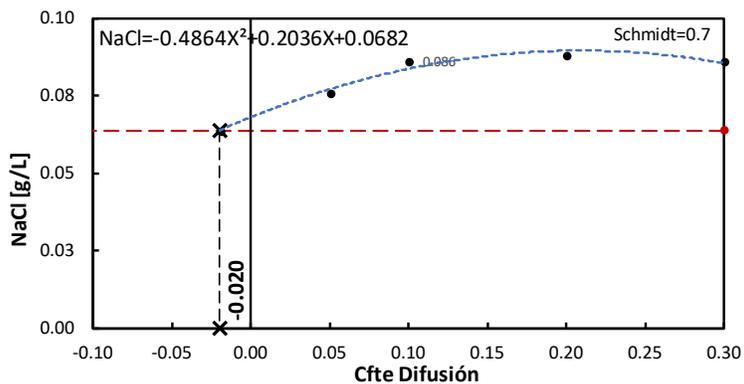
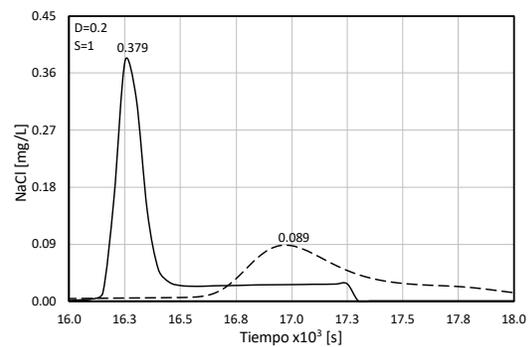
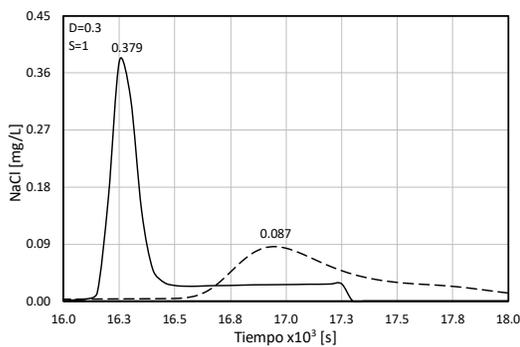


Figura 7-16 NaCl pico vs cte. de difusión – Tramo Río Lindo Abajo. Schmidt = 0.7

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de -0.020 , valor que físicamente no es posible, analizando la curva se obtiene un máximo en 0.209 , para lo cual el valor de NaCl sería de 0.090 g/L, valor muy por encima del esperado de 0.063 g/L medidos en campo, la otra raíz para que diera el valor medido en campo es de 0.437 valor por encima de los 0.10 estimados inicialmente con los datos de campo.

7.2.8 Grupo D Tramo 5-5 a 6-6 – Schmidt = 1.0

A continuación se presentan los resultados de las curvas del soluto (NaCl) para el tramo 5-5 a 6-6, donde se gráfica las concentraciones de NaCl en mg/L contra el tiempo medido en segundos para un número de Schmidt igual a 1.0.



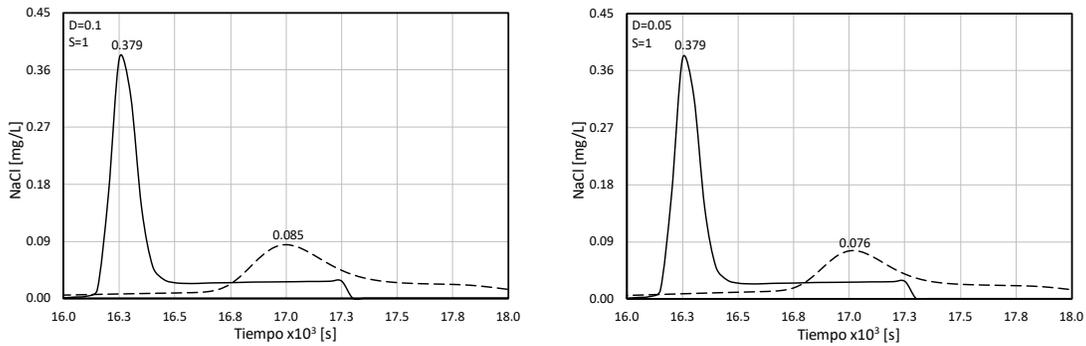


Figura 7-17 Resultados de calibración de trazador NaCl – Tramo Río Lindo Arriba. Schmidt=1.0

Con los anteriores resultados se analizan los picos y se grafican la concentración pico versus el coeficiente de difusión tomado:

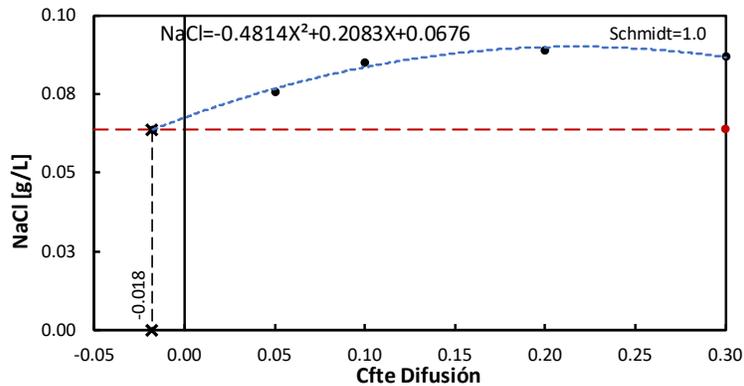


Figura 7-18 Concentraciones pico vs coeficiente de difusión – Tramo Río Lindo Abajo.

Se analiza cual curva se ajusta mejor a los resultados, encontrándose una ecuación polinómica de grado 2, y se interpola el valor del coeficiente de difusión para que la concentración pico calculada, sea igual a la concentración pico medida en campo, encontrándose un valor de -0.018, valor que físicamente no es posible, la curva se obtiene un máximo en 0.216 para lo cual el valor de NaCl sería de 0.090 g/L, valor muy por encima del esperado de 0.063 g/L medidos en campo, la otra raíz para que diera el valor

medido en campo es de 0.447 valor por encima de los 0.10 estimados inicialmente con los datos de campo.

7.3 Resumen de resultados

A continuación se presenta un resumen de los resultados, presentando los valores del número de Schmidt y su correspondiente valor de difusión para que el pico sea el correspondiente medido en campo.:

Tabla 7-3 Resumen de coeficientes de difusión – Río Lindo

Número de Schmidt	Coefficiente Difusión mínimo	Coefficiente Difusión máximo	Tramo
0.1	0.055	0.488	Río Lindo Arriba
0.5	0.058	0.524	
0.7	0.059	0.505	
1.0	0.059	0.513	
0.1	-0.147	0.543	Río Lindo Abajo
0.5	-0.037	0.608	
0.7	-0.020	0.437	
1.0	-0.018	0.447	

De la tabla anterior se presentan los valores de coeficiente de difusión que interceptan la línea de la concentración objetivo, dado que se utilizó una curva cuadrática de ajuste, mediante iteración se halla el valor mayor de cruce.

De los resultados anteriores tenemos que para un número de Schmidt de 0.7, se ajustan valores reales, es decir que físicamente pueden ser (por su valor positivo), por otra parte el valor correspondiente de 0.059 para el tramo Río Lindo Arriba, versus el valor -0.020 del tramo Río Lindo Abajo, se realiza un análisis de errores para el rango tomando aquel valor que minimiza el error para cada uno de los casos. Esto se puede realizar dado que para ambos casos, los valores están por debajo de los valores iniciales estimados en las tablas 5.22 y 5.23.

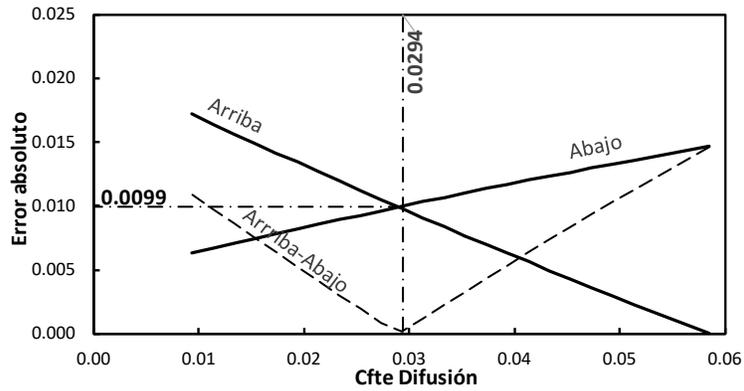


Figura 7-19 Errores absolutos en función del cte. de difusión

Del anterior análisis se obtiene un valor de coeficiente de 0.0294, para lo cual minimiza el error en cada uno de los tramos, se espera que este error este del orden de los 0.0099 mg/L.

7.4 Validación del valor adoptado

A continuación se presenta una corrida con un coeficiente de difusión de 0.0294 y un número de Schmidt de 0.7.

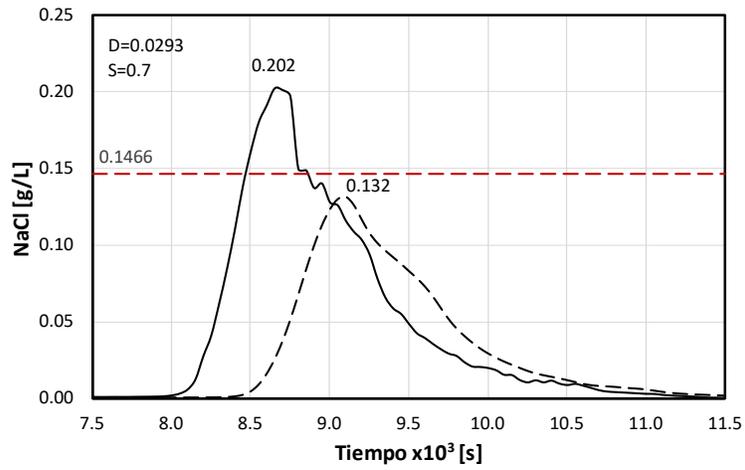


Figura 7-20 Verificación del coeficiente de dispersión – Tramo Rio Lindo Arriba

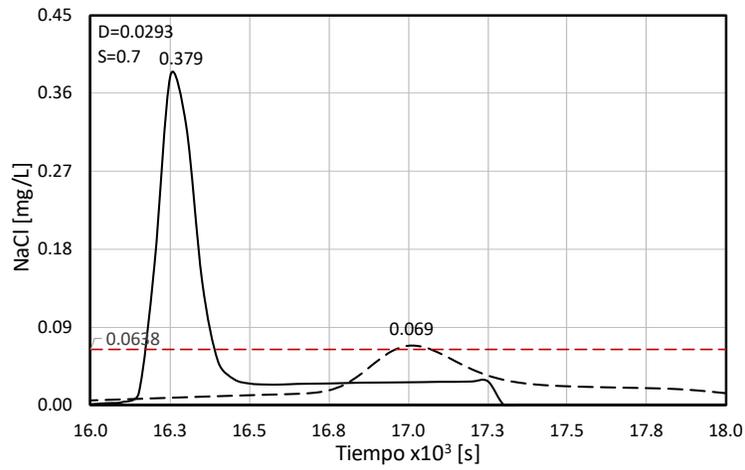


Figura 7-21 Verificación del coeficiente de dispersión – Tramo Rio Lindo Abajo

8 Simulación de alternativas

8.1 Escenarios planteados

Se presentarán cuatro escenarios de corridas, dos condiciones actuales y dos condiciones futuras.

1. Escenario No. 1 - Condición actual – 2018: En este escenario, se incluyen en el modelo las condiciones actuales de descargas con sus caudales y sus cargas contaminantes, se evaluará la calidad del río en la sección 5-5.
2. Escenario No. 2 – Condición actual caudales mínimos – 2018: En este escenario se tomará el caudal mínimo de acuerdo con el análisis del $7Q_{10}$, (Ver Anexo 06), que establece determinar mediante un análisis probabilístico el caudal mínimo con un tiempo de retorno de 10 años y se asignaran las descargas actuales con sus caudales y sus cargas contaminantes, se evaluará la condición del río en la sección 5-5.
3. Escenario No. 3 – Condición futura – 2045: En este escenario se tendrá en cuenta el crecimiento poblacional, (Ver Anexo 06), y se ajustan los valores de caudales de las descargas, con la tasa para el aumento poblacional, se mantienen los valores de las cargas contaminantes, el caudal del río será el del $7Q_{10}$. Se evaluará la condición del río en la sección 5-5.
4. Escenario No. 4 – Condición futura - 2045: Caudal $7Q_{10}$ En este escenario se tendrá en cuenta el crecimiento poblacional, (Ver Anexo 06), y se determinará el caudal futuro de descargas con el total de la población al año 2045, el caudal del río será el del $7Q_{10}$. Se evaluará la condición del río en la sección de salida del modelo hasta la confluencia del Calandaima y la descarga en el sitio de la PTAR estará con las condiciones de contaminantes definidas por la Resolución 0631 de 2015 del MinAmbiente.

De lo anterior, dado que se debe mantener un flujo permanente para mantener la lámina de agua estable, se realizó una corrida previa para la sección de la salida (Sección 5-5),

en donde se obtuvo que para un tiempo de 120k segundos se tenía estabilidad en la salida, de tal forma que las descargas serán iniciadas a partir de este tiempo. Lo anterior, debido a que el programa no permite cargar automáticamente corridas previas, se realiza una corrida completa desde el tiempo igual a cero hasta 300k segundos, garantizando un tiempo suficiente de modelación.

8.2 Escenario No. 1

Para realizar la modelación el software IBER requiere de unos datos iniciales de corrida.

8.2.1 Caudales base

De acuerdo con los datos recopilados en 5.2.1, tenemos los siguientes caudales de frontera o de entrada:

Tabla 8-1 Caudales base por asignar al modelo

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal Asignar [m ³ /s]	Descripción
Q. Pilama	K0 + 279.4	0.147	Caudal aguas arriba
Río Lindo Arriba	K0 + 576.5	0.087	Caudal aguas arriba
Río Lindo Abajo	K2 + 846.1	0.151	Quebrada Sirena
Río Lindo Abajo	K2 + 100.0	0.051	Afluente lateral derecha
Río Lindo Abajo	K1 + 480.2	0.051	Afluente lateral izquierda

8.2.2 Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas son las siguientes:

Variables Atmosféricas				
Río Lindo				
Tiempo [s]	Radiación(W/m2)	Viento_10(m/s)	TempAire(dec_C)	Humedad Relativa
0	139.20	3.93	27	0.78
45000	139.20	3.93	27	0.78

Figura 8-1 Condiciones atmosféricas – Río Lindo.

Para la determinación de las condiciones atmosféricas, se realizó la metodología de la FAO56 - Método Penman - Monteith con la temperatura en °C, humedad relativa, - Velocidad del viento en km/d y las horas de sol, todos son tomados de series de tiempo multianuales en el periodo de 1990 a 2020 de la estación IDEAM de Viotá y de Mosquera.

Tabla 8-2 Condiciones atmosféricas – Río Lindo – Fuente IDEAM

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
T _{max}	27.00	29.00	30.00	32.00	28.00	31.00	31.00	31.00	30.00	29.00	26.00	29.00
T _{min}	20.00	22.00	24.00	24.00	24.00	23.00	20.00	24.00	22.00	19.00	25.00	22.00
Rh _{media}	77.00	72.00	76.00	85.00	77.00	80.00	76.00	79.00	84.00	76.00	82.00	77.00
RH _{min}	61.00	57.26	62.76	65.55	67.94	61.56	52.03	63.06	64.50	53.84	79.57	61.23
Viento km/d	294.00	340.00	343.00	336.00	317.00	283.00	336.00	286.00	321.00	319.00	287.00	297.00
Horas Sol	4.50	4.00	3.90	4.60	5.20	5.10	6.10	6.10	5.50	5.00	5.00	4.40

Para la determinación de la radiación solar, se debe tener en cuenta la radiación de onda corta (proveniente del sol), de acuerdo con las diferentes fuentes consultadas (IDEAM 2020), la radiación corta esta del orden de los 0.25 μm y 0.40 μm que corresponde al 99% del espectro de radiación solar, y la radiación de onda corta terrestre será del orden de 0.25 μm a 2.8 μm.

Para el modelo de Penman – Monteith los datos de entrada o constantes serán:

Tabla 8-3. Coeficientes de entrada – Penman – Monteith

Variable	Mínimo	Máximo
Radiación Onda Corta [μm]	0.25	0.50
Albedo (Cfte. de reflexión)	0.23	
Latitud del proyecto	4.4387°d	
Elevación [m.s.n.m.]	550	

Para la determinación de la radiación solar incidente en la zona de estudios, se deberá tener en cuenta la declinación solar correspondiente a la época del año a considerarse y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Dec.Solar = 0.4093 \cdot \sin\left(\frac{2}{\pi} N_{días} - 1.39\right)$$

Las componentes esféricas corresponderán a la declinación solar y la latitud del sitio del proyecto:

$$xx = \sin(Dec.Solar) \cdot \sin(Latitud \text{ (radianes)})$$

$$yy = \cos(Dec.Solar) \cdot \cos(Latitud \text{ (radianes)})$$

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan(Dec.Solar) \cdot \tan(Latitud \text{ (radianes)}))$$

El coeficiente de incidencia solar en función del día del año corresponde a:

$$dr = 1 + \frac{1}{30} \cos\left(\frac{2\pi}{365} N_{días}\right)$$

La radiación extraterrestre corresponde a:

$$Ra = 37.586 \cdot dr(\omega \cdot xx + \sin(\omega) \cdot yy)$$

La radiación solar neta incidente (caso masa terrestre) corresponde a:

$$Rn_{Solar} = (1 - \alpha) \cdot Ra \cdot \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right)$$

Siendo:

$$Rn_{solar} = \text{Radiación neta solar en } \frac{MJ}{m^2 d}$$

α = Coeficiente de reflexión

a_s = Onda corta (mínimo)

b_s = Onda corta (máximo)

n = Horas promedio de sol (día)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega, \text{ Horas diurnas en función de la latitud}$$

Para obtener La radiación en W/m^2 , se divide en 86400 segundos para pasar de J/d a W

Con lo anterior, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 8-4. Resultados de radiación Solar

No. Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Días Lluvia	5	6	9	13	12	4	4	5	8	15	12	6
Días totales	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365
No. Días	26	53	81	107	139	177	208	238	265	289	322	359
Declin. Sol	-0.31	-0.15	0.06	0.26	0.38	0.40	0.32	0.14	-0.07	-0.26	-0.38	-0.40
xx	-0.02	-0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03
yy	0.95	0.99	0.99	0.96	0.92	0.92	0.95	0.99	0.99	0.96	0.92	0.92
Omega	1.55	1.56	1.58	1.59	1.60	1.60	1.60	1.58	1.57	1.55	1.54	1.54
dr	1.03	1.02	1.01	0.99	0.98	0.97	0.97	0.98	0.99	1.01	1.02	1.03
Ra	35.35	37.12	37.91	37.08	35.59	35.06	35.93	37.02	36.89	35.29	33.86	33.79
N	11.81	11.91	12.04	12.16	12.24	12.25	12.19	12.08	11.96	11.84	11.76	11.75
Rn_{solar}	11.99	11.94	12.03	12.54	12.67	12.37	13.84	14.32	13.63	12.53	12.06	11.38
$Rn_{solar} W/m^2$	138.77	138.24	139.20	145.15	146.69	143.15	160.15	165.76	157.78	145.04	139.59	131.68

De los resultados anteriores, dado que los datos fueron tomados en el mes de marzo, se toma como valor de radiación solar neta $139.20 W/m^2$.

8.2.3 Valor base de OD

También el software necesita inicializar el modelo con un valor inicial de OD, para ellos se toman las diferentes medidas tomadas en 5.10 (Ver Figura 5-15).

Tabla 8-5 Valores de OD inicial, para diferentes tramos del Río Lindo

Punto	OD₅ [mg/L]	OD₃₀ [mg/L]
P.1 Río Lindo arriba	6.407	3.547
P.2 Río Lindo arriba	6.310	2.857
P.3 Río Lindo abajo confluencia con la Q. Pilama	6.407	3.054
P.4. Río lindo después descarga 10	6.407	3.251
P.5 Río Lindo después descarga 12	6.310	2.266
P.6 Río Lindo PTAR	6.407	1.478
Promedio	6.375	2.742

Para la asignación del valor se tomará como el valor promedio de los datos de la OD inicial, para incluirlo en el modelo este valor es de 6.375 [mg/L].

8.2.4 Valor base de DBOC

También el software necesita inicializar el modelo con un valor inicial de DBOC, para ellos se toman las diferentes medidas tomadas en 5.10 (Ver Figura 5-15).

Tabla 8-6 Valores de DBO₅, inicial para diferentes tramos del Río Lindo

Punto	DBO [mg/L]
P.1 Río Lindo arriba	11.649
P.2 Río Lindo arriba	8.737
P.3 Río Lindo abajo confluencia con la Q. Pilama	11.649
P.4. Río lindo después descarga 10	10.193

Punto	DBO [mg/L]
P.5 Río Lindo después descarga 12	11.649
P.6 Río Lindo PTAR	13.105
Promedio	11.164

Con lo anterior se calcula la $DBOUC = L_{AR}$ de las muestras:

$$DBO_5 = L_{AR}(1 - e^{-K_1 t})$$

Tomando como tasa $K_1 = 0.0162$ (Ver tabla 5.29), y $t = 5$ días, se obtienen los valores de $DBOUC$ para las muestras:

Tabla 8-7 Valores de $DBOUC$ para las descargas

Punto	DBO_5 [mg/L]	$DBOUC$ [mg/L]
P.1	11.649	149.56
P.2	8.737	112.18
P.3	11.649	149.56
P.4	10.193	130.87
P.5	11.649	149.56
P.6	13.105	168.26
Promedio		143.33

Para la asignación del valor se tomará como el valor promedio de los datos del $DBOUC$ inicial, para incluirlo en el modelo este valor es de 143.33 [mg/L].

8.2.5 Valor base de temperatura

Para la asignación del valor base se tomará los siguientes valores:

Tabla 8-8 Valores de Temperatura, inicial para diferentes tramos del Río Lindo

Punto	T [°C]
P.1 Río Lindo arriba	23.2
P.2 Río Lindo arriba	23.2
P.3 Río Lindo abajo confluencia con la Q. Pilama	23.3
P.4. Río lindo después descarga 10	25.0
P.5 Río Lindo después descarga 12	25.0
P.6 Río Lindo PTAR	24.4
Promedio	24.0

Para la asignación del valor se tomará como el valor promedio de los datos de la temperatura, para incluirlo en el modelo este valor es de 24.0 [°C].

8.2.6 Valor base de demanda de oxígeno de sedimento

De acuerdo con 5.17, se le asigna un valor inicial de 0.15 [g/m²d] al mallado

8.2.7 Descargas con carga contaminante.

Las descargas corresponderán a los valores de DBO a 30 días obtenidos en el laboratorio:

Tabla 8-9 Valores de DBO a 5 días para las descargas puntuales – Río Lindo.

Punto	Sección	OD 5 días [mg/L]	Caudal [m ³ /s]	Coordenadas X, Y, Z
D.7	Desc. 7 - K0 + 415	0	0.0000326	950854.40, 982700.30, 563.00
D.8	Desc. 8 - K0 + 225	5.339	0.0007167	950677.40, 982743.50, 556.74
D.10	Desc. 10 - K3 + 040	2.524	0.0013017	950367.40, 982747.30, 548.65
D.11	Desc. 11 - K2 + 605	4.465	0.0000915	950445.20, 982976.60, 545.15
D.12	Desc. 12 - K2 + 592	3.301	0.0006831	950450.50, 982985,.80 545.00

Con lo anterior se calcula la DBO₅ = L_{AR} de las descargas:

$$DBO_5 = L_{AR}(1 - e^{-K_1 t})$$

Tomando como tasas $K_1 = 0.0162$ (Ver tabla 5.29), y $t = 5$ días, se obtienen los valores de DBOUC para las descargas:

Tabla 8-10 Valores de DBOUC para las descargas

Punto	Sección	DBO ₅ [mg/L]	DBOUC [mg/L]
D.7	Desc. 7 - K0 + 415	198.034	2542.57
D.8	Desc. 8 - K0 + 225	17.474	224.35
D.10	Desc. 10 - K3 + 040	116.491	1495.64
D.11	Desc. 11 - K2 + 605	29.123	373.91
D.12	Desc. 12 - K2 + 592	93.193	1196.51

A continuación se presenta un ejemplo de la asignación de la descarga en el modelo:

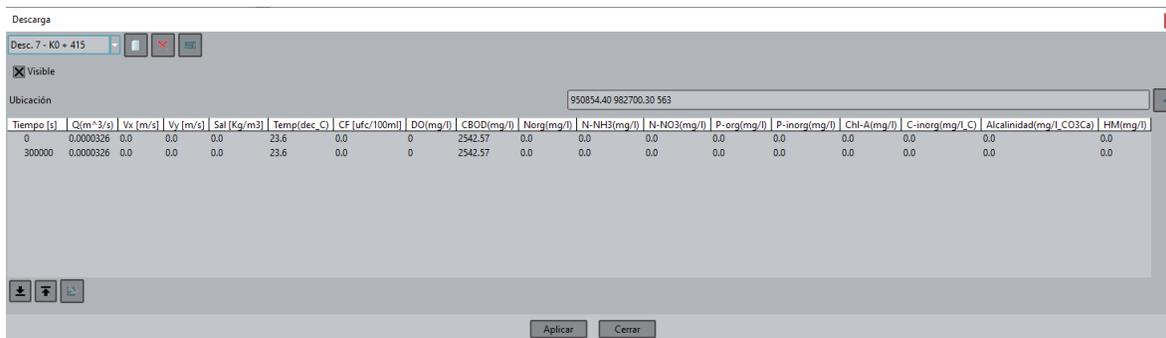


Figura 8-2 Asignación de valores de descarga para caudal, temperatura, DBO y DBOC – Río Lindo.

8.3 Escenario No. 2

El escenario No. 2 requiere ajustar el caudal base con el caudal $7Q_{10}$, que corresponde a caudales mínimos. A partir de la información de la serie de tiempo de caudales medios para el río Lindo a la altura del casco urbano del municipio de Viotá, tomados por la CAR (2020), se realiza el respectivo análisis probabilístico de modelo para eventos extremos en este caso de mínimos (Ver Anexo 06).

8.3.1 Caudales por incorporar al modelo

Para efectos de los caudales asignados bases, se asumirá el mismo valor para la quebrada La Sirena (K2 + 846.074) de la quebrada Pilama, para los caudales mínimos, dado que no hay datos aforados de su caudal.

Tabla 8-11 Caudales mínimos por asignar al modelo

Tramo	Sección Transversal HEC-RAS	Caudal Asignar [m ³ /s]	Descripción
Q. Pilama	K0 + 279	0.0010	Caudal aguas arriba
Río Lindo Arriba	K0 + 576	0.0057	Caudal aguas arriba
Río Lindo Arriba	K0 + 415	0.0000326	Descarga 7
Río Lindo Abajo	K0 + 225	0.0007167	Descarga 8
Río Lindo Abajo	K3 + 040	0.0013017	Descarga 10
Río Lindo Abajo	K2 + 846	0.0010	Quebrada Sirena
Río Lindo Abajo	K2 + 605	0.00009150	Descarga 11
Río Lindo Abajo	K2 + 595	0.0006831	Descarga 12
Río Lindo Abajo	K2 + 100	0.0005	Afluente lateral derecha ¹
Río Lindo Abajo	K1 + 480	0.0005	Afluente lateral izquierda ¹

¹ Se adoptan 50% de la Q. Sirena por no tener datos

8.3.2 Descargas con carga contaminante.

Las descargas corresponderán a los valores calculados en el escenario No. 1 (Ver tablas 8-9 y 8-10).

8.4 Escenario No. 3

Para el escenario No. 3, se establecerán los caudales de vertimiento teniendo en cuenta el aumento de la población para un horizonte a 25 años (Decreto 0330, Art. 40, MVCT 2017).

Tabla 8-12 Proyección de población 2018-2045

	Año	Población
Censo	2018	4 286
PROYECCIÓN	2020	4 617
	2025	4 914
	2030	5 231
	2035	5 573
	2040	5 942
	2045	6 344

De lo anterior:

$$6344 = 4286(1 + i)^{27}$$

Resolviendo para el periodo 2018 – 2045 se tendrá una tasa anual de $i = 1.463\%$ de crecimiento.

Por lo tanto, los caudales ajustados para las respectivas descargas serán:

Tabla 8-13 Proyección caudal de descargas

Punto	DBO ₃₀ [mg/L]	Caudal 2018 [m ³ /s]	Caudal 2045 [m ³ /s]
D.7	230.60	0.0000326	0.0000483
D.8	20.35	0.0007167	0.0010608
D.10	135.65	0.0013017	0.0019267
D.11	33.91	0.0000915	0.0001354
D.12	108.52	0.0006831	0.0010111

El caudal base del río se tomará el respectivo $7Q_{10}$, determinado en el escenario No. 2.

8.4.1 Descargas con carga contaminante.

Las descargas corresponderán a los valores calculados en el escenario No. 1 (Ver tablas 8-9 y 8-10).

8.5 Escenario No. 4

Para el escenario No. 4 se realizará el cálculo del caudal futuro de vertimiento para el total de la población, teniendo en cuenta los parámetros del RAS 2017.

8.5.1 Caudal futuro de vertimiento

Dado que la población está ubicada a menos de 1000 m.s.n.m, el factor de dotación máxima demanda poblacional será de 140 L/d/hab (Art. 43, RAS 2017) y teniendo en cuenta el Art. 134 tendremos:

$$Q_D = \frac{C_R \cdot P \cdot D_{Neta}}{86400}$$

Donde

D_{Neta} = Dotación neta

P = Población al horizonte de diseño

C_R = Coeficiente de retorno igual a 0.85

Con lo anterior tenemos un caudal medio de:

$$Q_D = \frac{0.85 \cdot 6344 \cdot 140}{86400} = 8.74 \text{ L/s}$$

El caudal máximo horario será tomar el caudal medio y multiplicarlo por un factor de mayoración, que para este caso se tomará el factor de mayoración de Harmon, o Babbi, o Flores, el cual debe estar entre 1.4 y 3.8 (Art.134 RAS 2017).

$$F = 1 + \frac{14}{4 + P^{0.5}} \text{ Harmon}$$

$$F = \frac{5}{p^{0.2}} \text{ Babbi}$$

$$F = \frac{3.5}{p^{0.1}} \text{ Flores}$$

Con las ecuaciones anteriores tenemos los siguiente factores:

Tabla 8-14 Coeficiente de mayoración para caudal horario

Factor	F
Harmon	1.17
Babbi	0.87
Flores	1.46

Por lo tanto el caudal máximo horario será:

$$QMH = 1.46 \times 8.738 = 12.74 \text{ L/s}$$

Como se deben tener en cuenta la infiltración al sistema y las posibles conexiones erradas, el RAS determina que se deben tomar los siguientes coeficientes para su cálculo: infiltración 0.1 o 0.2 [L/s/ha] y erradas 0.10 a 0.20 [L/s/ha], como el área estimada de servicio para el municipio es de 69.9 ha, tenemos los siguientes caudales por erradas y de infiltración:

Tabla 8-15 Caudales por conexiones erradas e infiltración

Caudal	Factor	Caudal [L/s]
Erradas	0.1	6.99
Infiltración	0.2	13.98
Total	0.3	20.97

Con lo anterior se tendría un caudal total de residuales de:

$$Q_R = 12.74 + 20.97 = 33.71 \text{ L/s}$$

8.6 Asignación de carga contaminante

De acuerdo con la normatividad vigente, la resolución 631 de 2015 de MinAmbiente en su artículo 8 determina que el valor máximo permisible de vertimiento para sistemas de alcantarillado entregando a cuerpo de agua superficiales será para DBO₅ de 90 [mg/L], y el caudal base de modelado será el correspondiente el encontrado en el escenario No. 2 el del 7Q₁₀.

De lo anterior, se asumen que para el OD en el punto de la descarga de la PTAR será de 0.0 [mg/L], y el DBOUC será:

$$90 \text{ [mg/L]} = L_{AR}(1 - e^{-0.0162 \times 5})$$

$$L_{AR} = \frac{90 \text{ [mg/L]}}{(1 - e^{-0.0162 \times 5})}$$

$$L_{AR} = 1155.52 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$$

Resumiendo los parámetros de la descarga de la PTAR serán:

Tabla 8-16 Parámetros de descarga PTAR – Río Lindo

Punto	Sección	OD [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	DBOUC [mg/L]
PTAR	5-5 – K1 + 350	0.0	90.0	1155.52

Con modelaciones previas se establece un valor de aplicación de la descarga a los 120k segundos, que es donde se tiene estabilizada la lámina de agua en la sección de interés (Sección 5-5).

8.7 Análisis de los resultados en términos de calidad del agua (normatividad vigente).

De acuerdo con la resolución 631 de 2015 del MinAmbiente, donde definen los límites de parámetros de vertidos contaminantes, en su capítulo 5, artículo 8, para lo concerniente a vertidos de alcantarillado para aguas residuales domésticas, define que deben ser menores a 90 mg/L para la DBO₅, por otra parte, en la guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales del año 2018, del MinAmbiente contextualiza lo siguiente: *“En términos generales, cuando la demanda de oxígeno generada por las cargas contaminantes en el cuerpo de agua receptor es el principal problema de contaminación, los esfuerzos de modelación se deben enfocar en determinar el impacto de los vertimientos o descargas en los periodos secos o de estiaje y teniendo un caudal base mínimo, debido a que las cargas contaminantes durante las condiciones de estiaje se caracterizan normalmente por ser constantes en términos de volumen y concentración”*, situación que puede describirse que en la toma de los datos realizadas, se obtuvo en época de estiaje, situación considerada para el escenario 1, y para las condiciones críticas de caudal mínimo con tiempo de retorno a 10 años, de los escenarios 2 a 4.

Por otra parte, se presenta para verificación en los escenarios 1 a 3 que la sección correspondiente a la descarga de la PTAR futura, se estime los parámetros de DBO₅ para verificar contra lo que pide la normatividad (CAR), que para todo caso debe ser menor a 7.0 mg/L, con lo anterior, se puede inferir si el sitio de ubicación de la PTAR es el adecuado.

Para el escenario 4, que es el modelo con la descarga de la PTAR, se verificará que antes de la sección de confluencia del río Lindo y el río Calandaima se obtenga valores menores a los solicitados por la normatividad, es decir que nuevamente la ubicación de la futura PTAR es la adecuada para que no existan efectos adversos en la calidad del río Lindo antes de su confluencia con el río Calandaima.

8.8 Resultados del Escenario No. 1

8.8.1 Lámina de agua

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene la siguiente lámina:

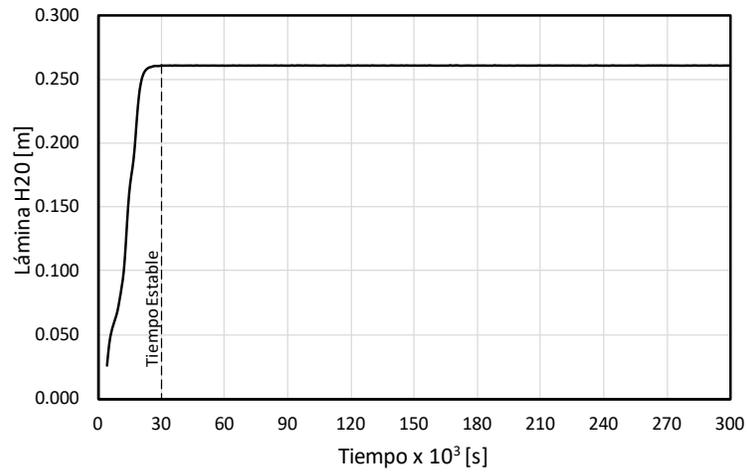


Figura 8-3. Lámina de agua en la sección 5-5, Escenario 1.

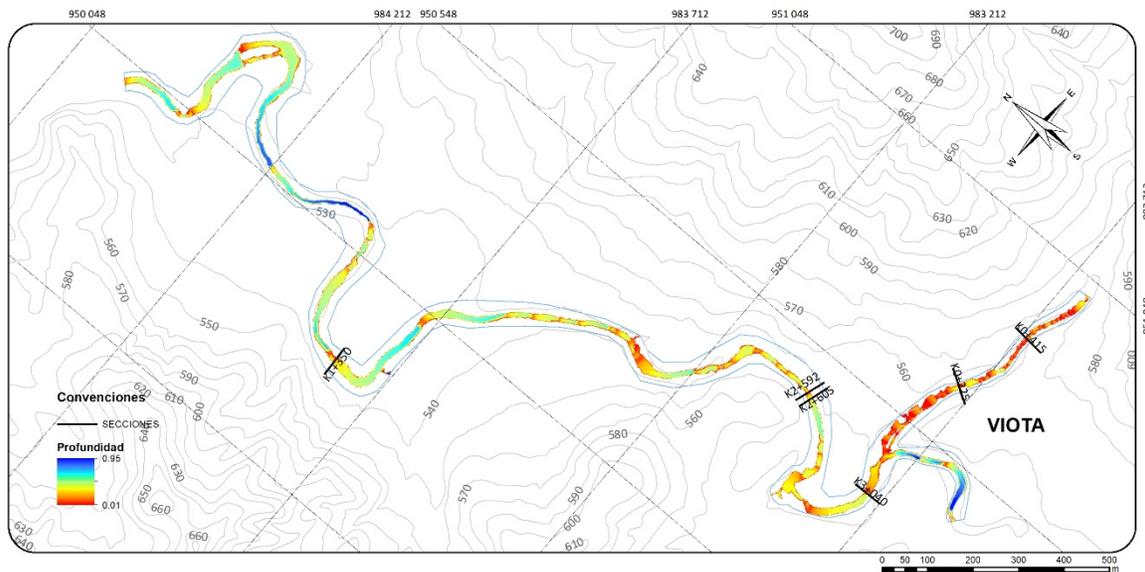


Figura 8-4 Mapa de resultados para la lámina de agua Escenario No. 1 – Río Lindo.

Como se aprecia hay estabilización de la lámina a partir de los 30000 segundos de modelación, por lo tanto se toma partir de este tiempo la verificación de los parámetros modelados.

8.8.2 DBOC

Para la sección de la zona de la PTAR se obtienen el siguiente valor de DBOC:

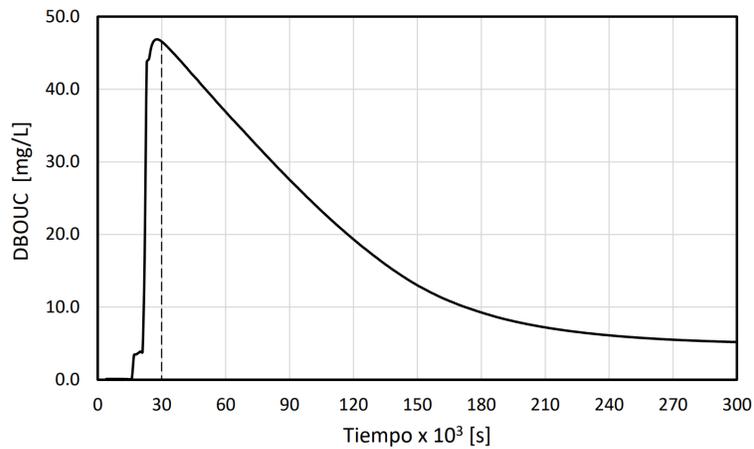


Figura 8-5 DBOC en mg/L Sección 5-5, Escenario 1

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores de la DBOC se estabiliza hacia los 300k segundos con un valor de 5.0 mg/L, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se asimilan las cargas contaminantes antes de esta sección.

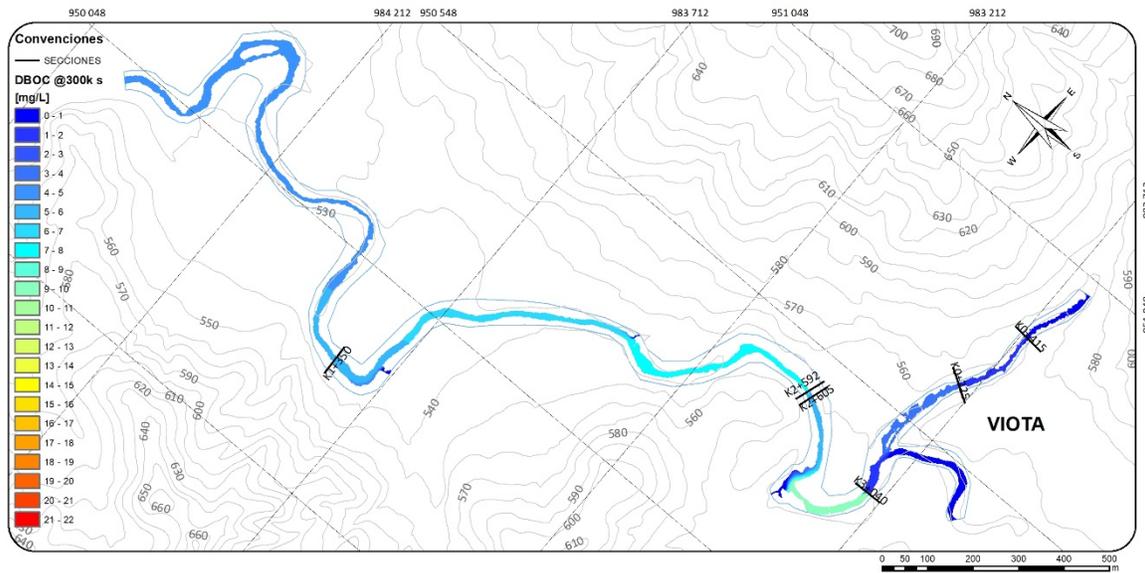


Figura 8-6 Mapa de resultados para DBOC Escenario No. 1 – Río Lindo.

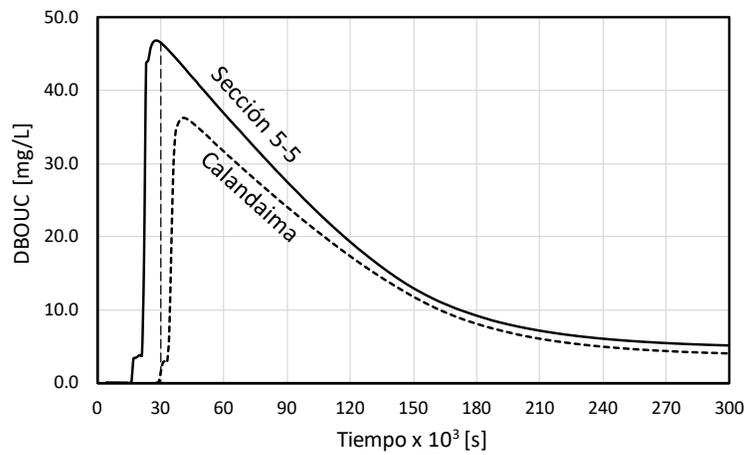


Figura 8-7 Comparativo DBOC – Sección 5-5 y Confluencia Calandaima

8.8.3 OD

Para la sección de la zona de la PTAR se obtienen los siguientes valores de OD:

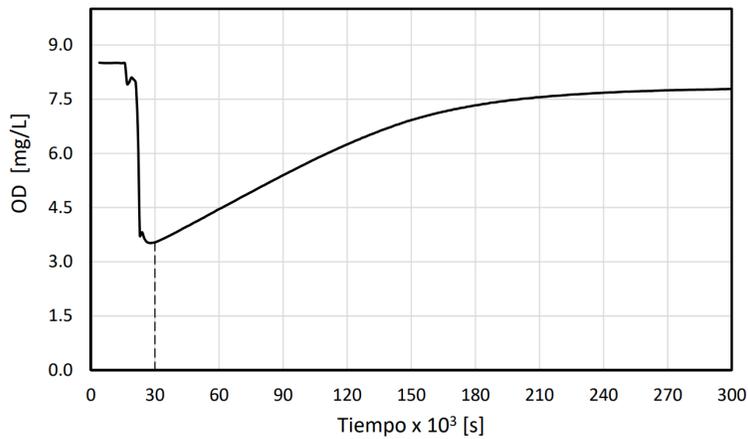


Figura 8-8 OD en mg/L Sección 5-5, Escenario 1

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores del OD se estabiliza hacia los 300k segundos con un valor de 7.5 mg/L, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se recuperan sus niveles de saturación.

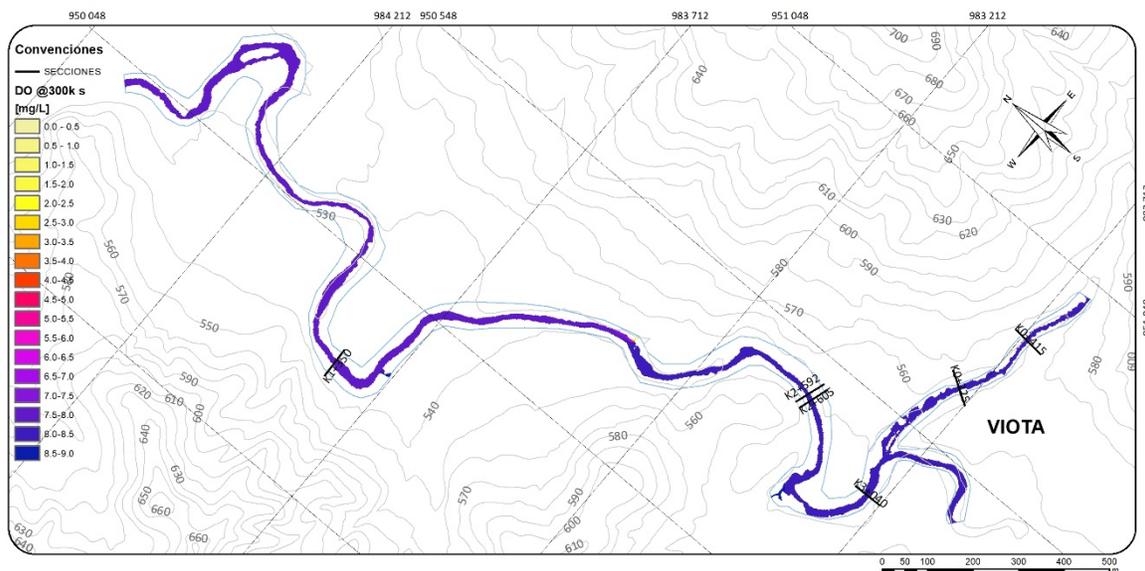


Figura 8-9 Mapa de resultados para OD Escenario No. 1 – Río Lindo.

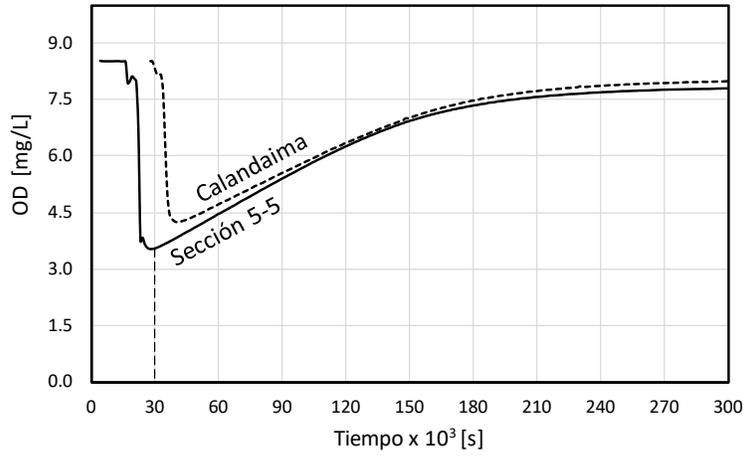


Figura 8-10 Comparativo OD – Confluencia Calandaima

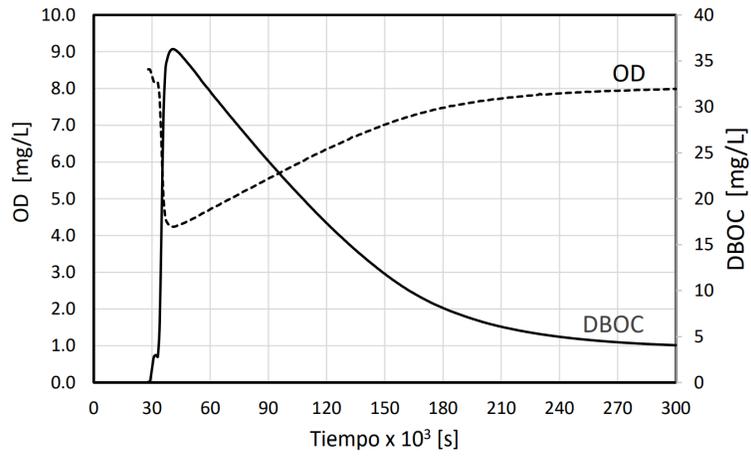


Figura 8-11 Comparativo de OD vs DBOC – Calandaima Escenario 1

8.9 Escenario No. 2

8.9.1 Lámina de agua

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene la siguiente lámina:

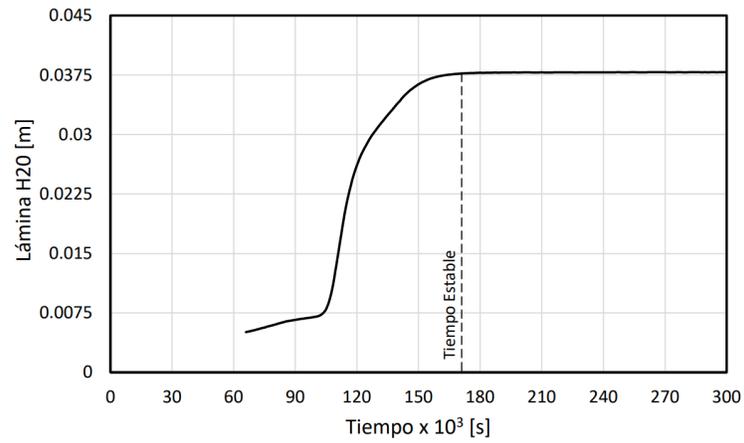


Figura 8-12. Lámina de agua en la sección 5-5, Escenario 2.

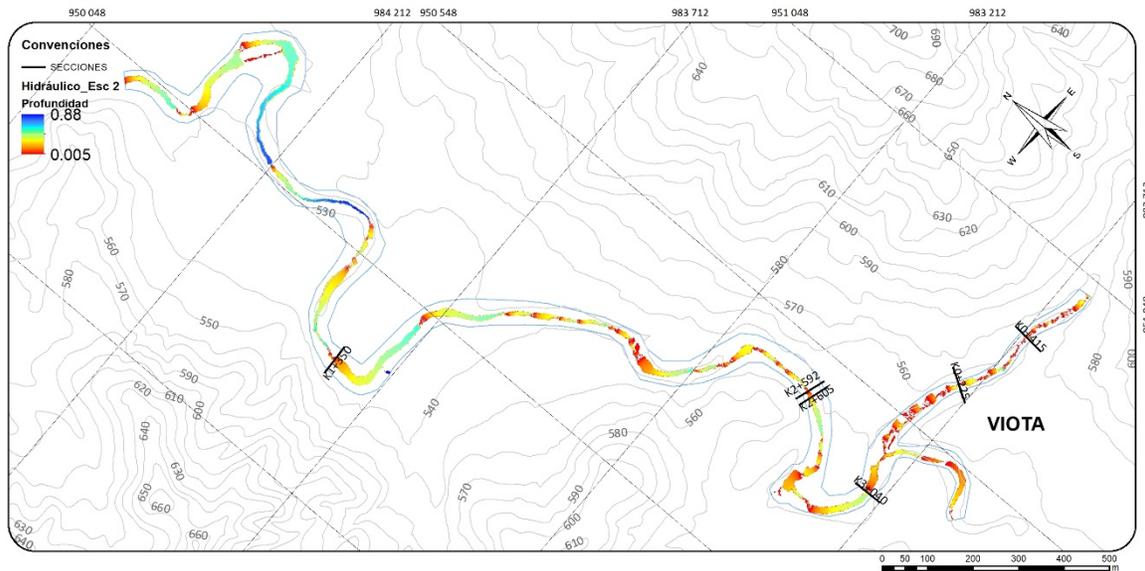


Figura 8-13 Mapa de resultados para la lámina de agua Escenario No. 2 – Río Lindo

Como se aprecia hay estabilización de la lámina a partir de los 171k segundos de modelación, por lo tanto se toma partir de este tiempo la verificación de los parámetros modelados.

8.9.2 DBOC

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene el siguiente valor de DBOC:

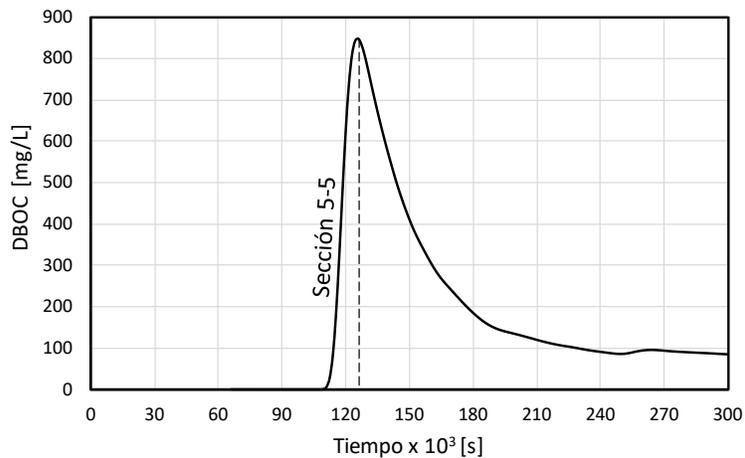


Figura 8-14 DBOC en mg/L Sección 5-5, Escenario 1

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores de la DBOC se estabiliza hacia los 220k segundos con un valor de 100 mg/L, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se asimilan las cargas contaminantes antes de esta sección.

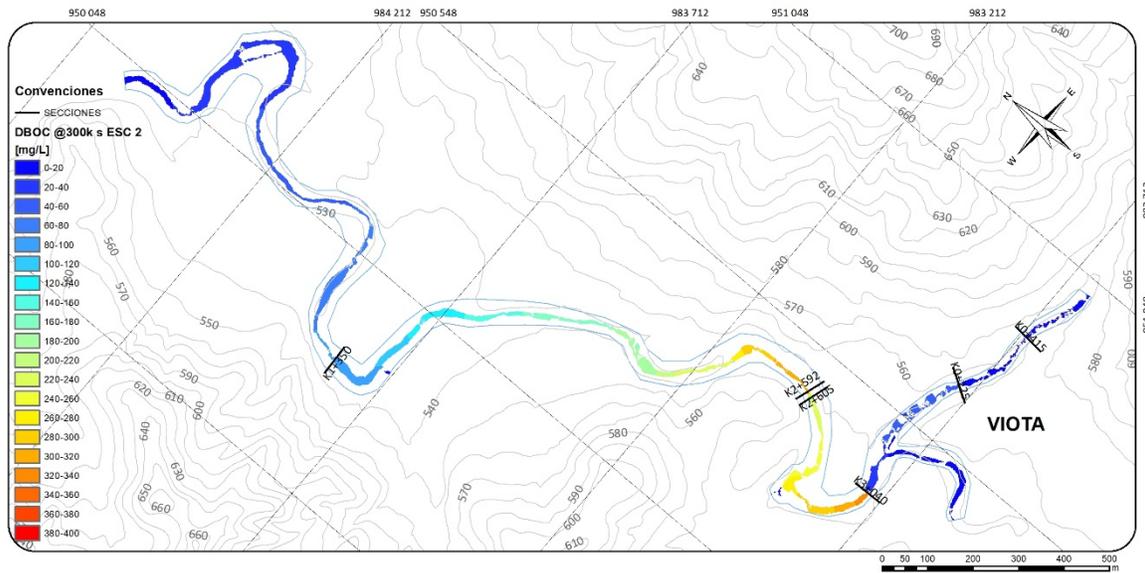


Figura 8-15 Mapa de resultados para DBOC Escenario No. 2 – Río Lindo

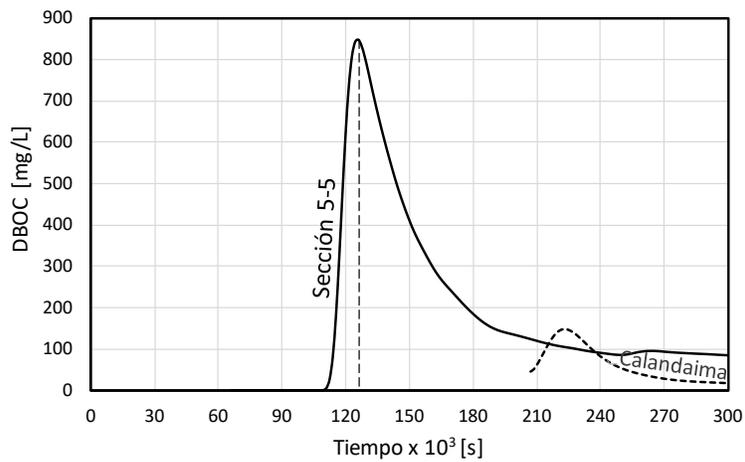


Figura 8-16 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

8.9.3 OD

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene los siguientes valores de OD:

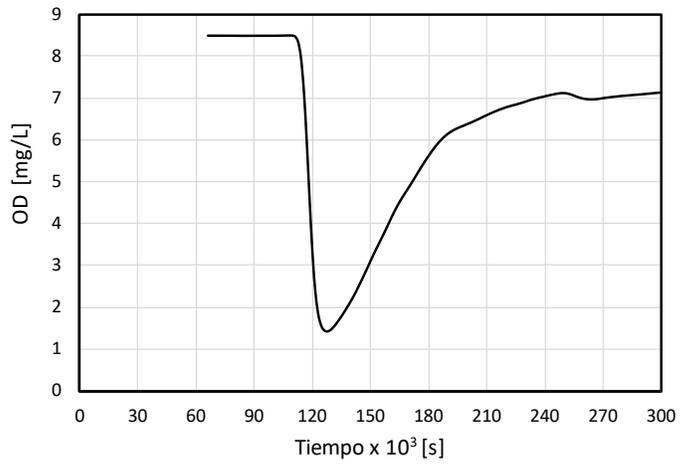


Figura 8-17 OD en mg/L Sección 5-5, Escenario 2

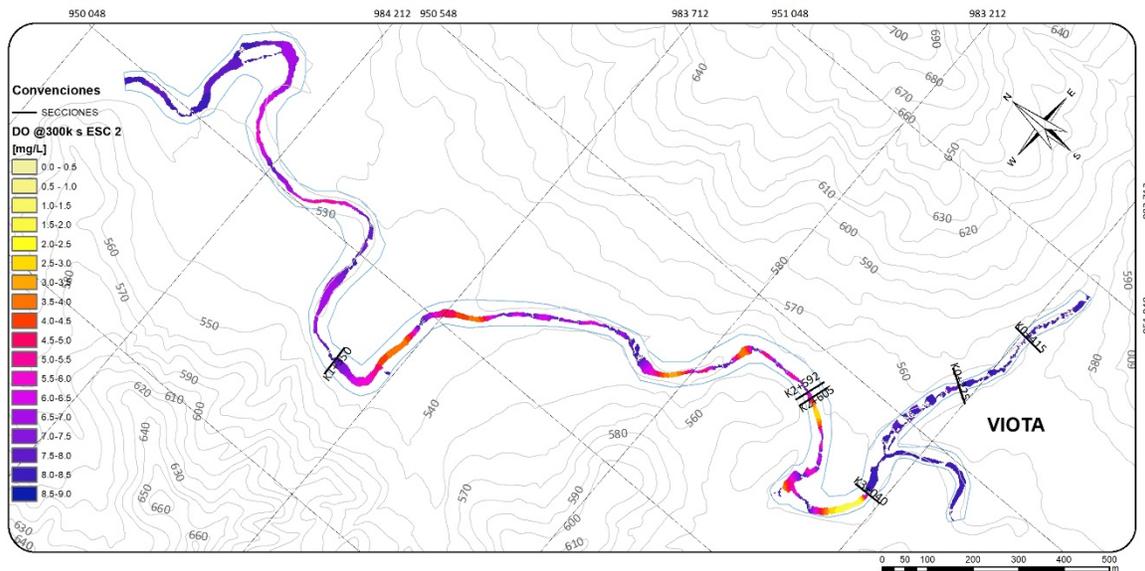


Figura 8-18 Mapa de resultados para OD Escenario No. 2 – Río Lindo

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores del OD se estabiliza hacia los 240k segundos, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se recuperan sus niveles de saturación.

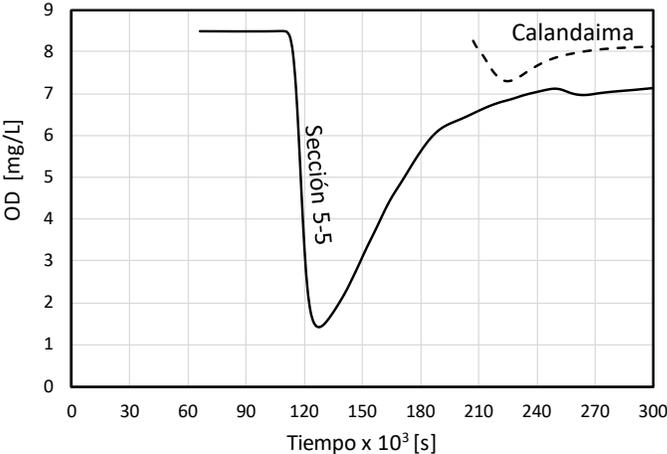


Figura 8-19 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

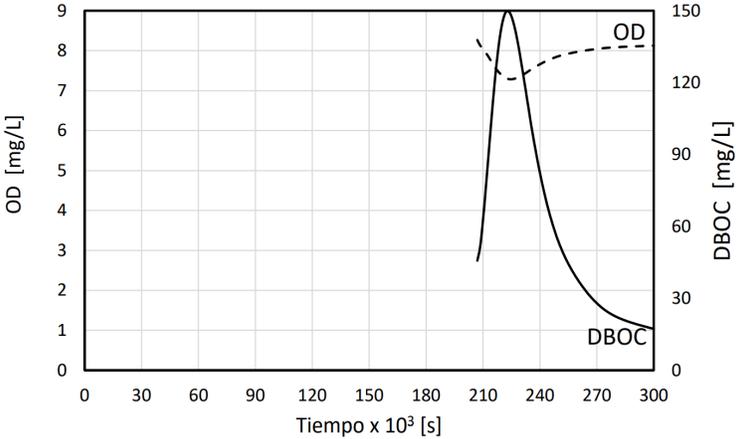


Figura 8-20 Comparativo de OD vs DBOC – Calandaima Escenario 2

8.10 Escenario No. 3

8.10.1 Lámina de agua

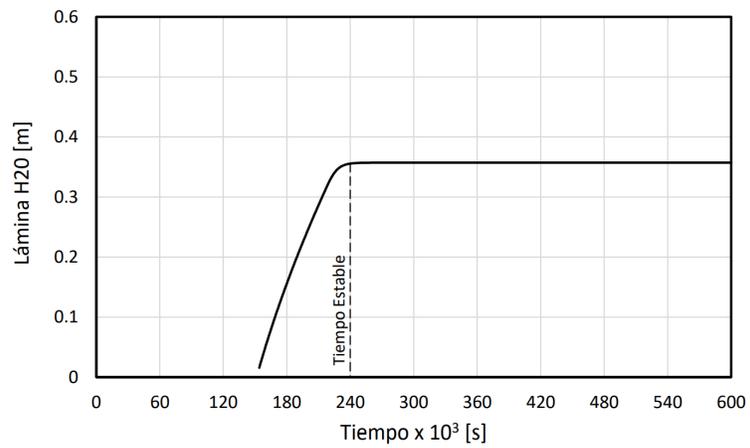


Figura 8-21 Lámina de agua en la sección 5-5, Escenario 3.

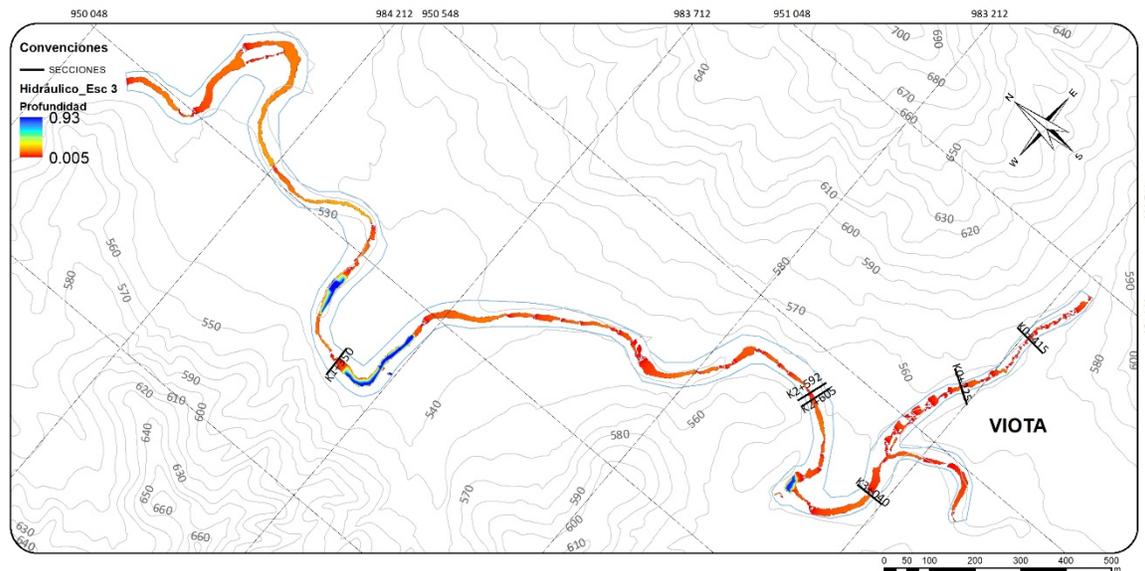


Figura 8-22 Mapa de resultados para la lámina de agua Escenario No. 3 – Río Lindo.

Como se aprecia hay estabilización de la lámina a partir de los 240k segundos de modelación, por lo tanto se toma partir de este tiempo la verificación de los parámetros modelados.

8.10.2 DBOC

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene el siguiente valor de DBOC:

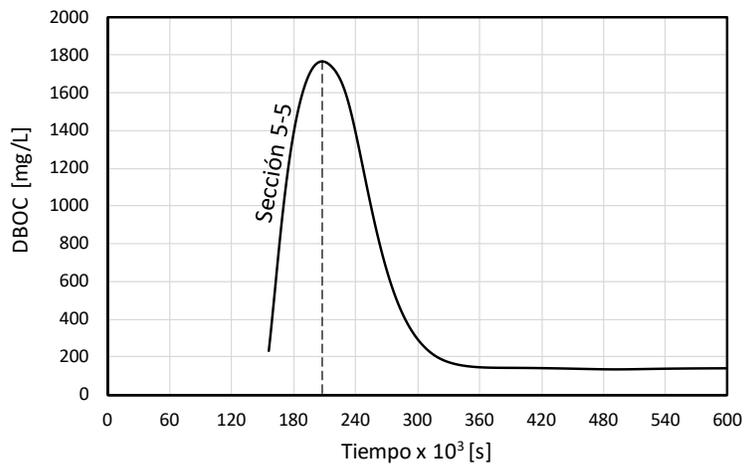


Figura 8-23 DBOC en mg/L Sección 5-5 Escenario 3

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores de la DBOC se estabiliza hacia los 360k segundos con un valor de 140 mg/L, y con la sección antes de la confluencia se observa cómo se asimilan las cargas contaminantes antes de esta sección.

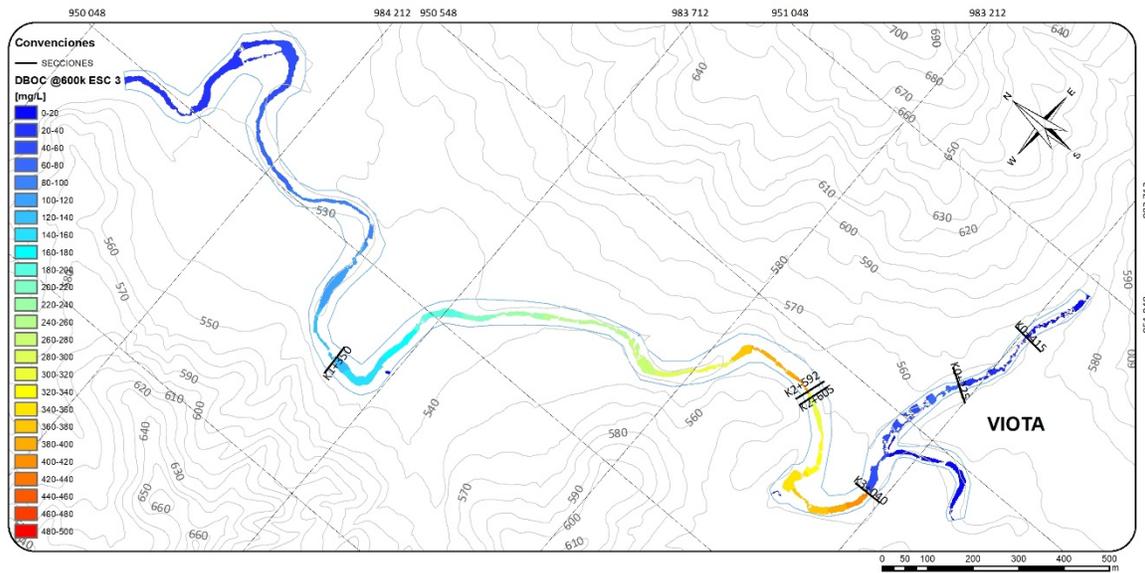


Figura 8-24 Mapa de resultados para DBOC Escenario No. 3 – Río Lindo

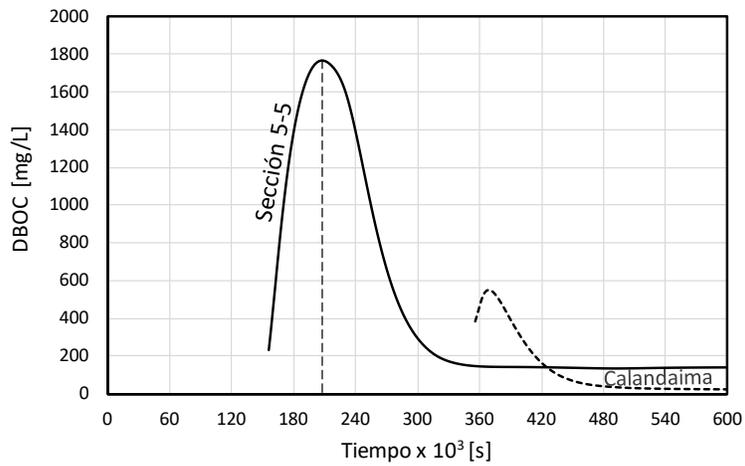


Figura 8-25 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores de la DBOC se estabiliza a los 360k segundos con un valor de 140 mg/L. Dado que para lograr modelar la sección

de salida en la confluencia con el río Calandaima, se requiere modelar hasta los 600k por que el caudal es tan pequeño para la sección que algunas zonas de bajos o depresiones en el cauce se demoran mucho tiempo en llenar, imposibilitando que en un tiempo menor a los 600k segundos se llegue siquiera hasta la sección final, obteniéndose un valor final de DBOC de 23 mg/L.

8.10.3 OD

Para la sección de la zona de la PTAR se obtienen los siguientes valores de OD:

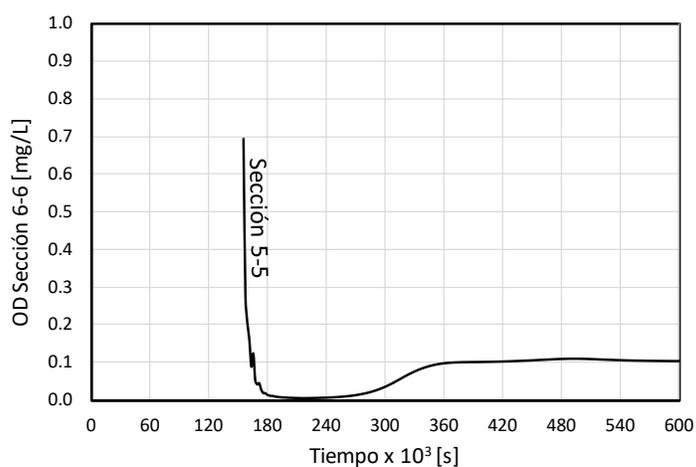


Figura 8-26 OD en mg/L Sección 5-5, Escenario 3

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores del OD se estabilizan a los 360k segundos con un valor de 0.1 mg/L, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se recuperan sus niveles de saturación hasta los 8 mg/L.

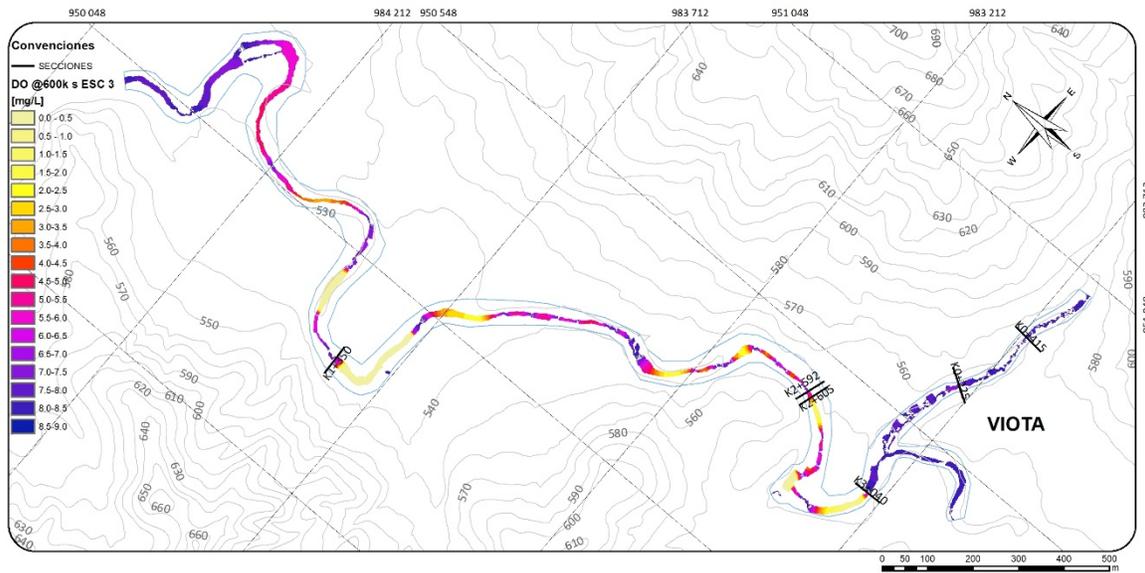


Figura 8-27 Mapa de resultados para OD Escenario No. 3 – Río Lindo

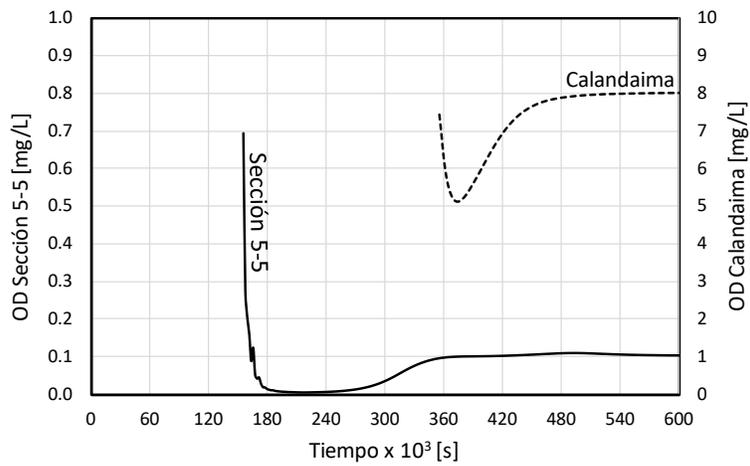


Figura 8-28 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

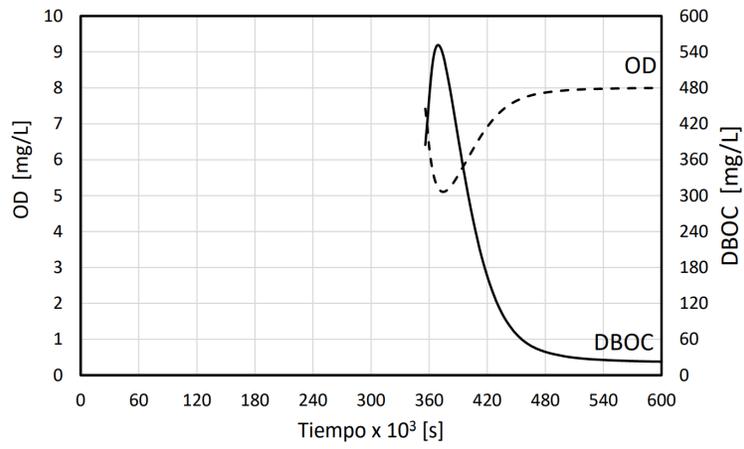


Figura 8-29 Comparativo de OD vs DBOC – Calandaima Escenario 3

8.11 Escenario No. 4

8.11.1 Lámina de agua

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene la siguiente lámina aguas en la sección del vertido de la descarga

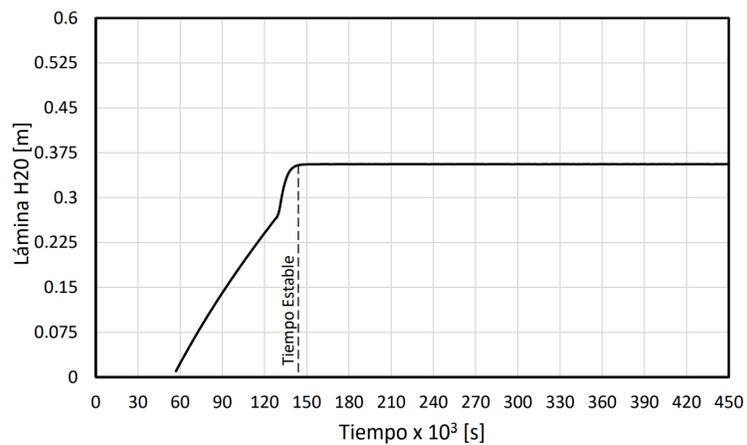


Figura 8-30. Lámina de agua en la sección 5-5, Escenario 1.

Como se aprecia hay estabilización de la lámina a partir de los 144k segundos de modelación, por lo tanto se toma partir de este tiempo la verificación de los parámetros modelados.

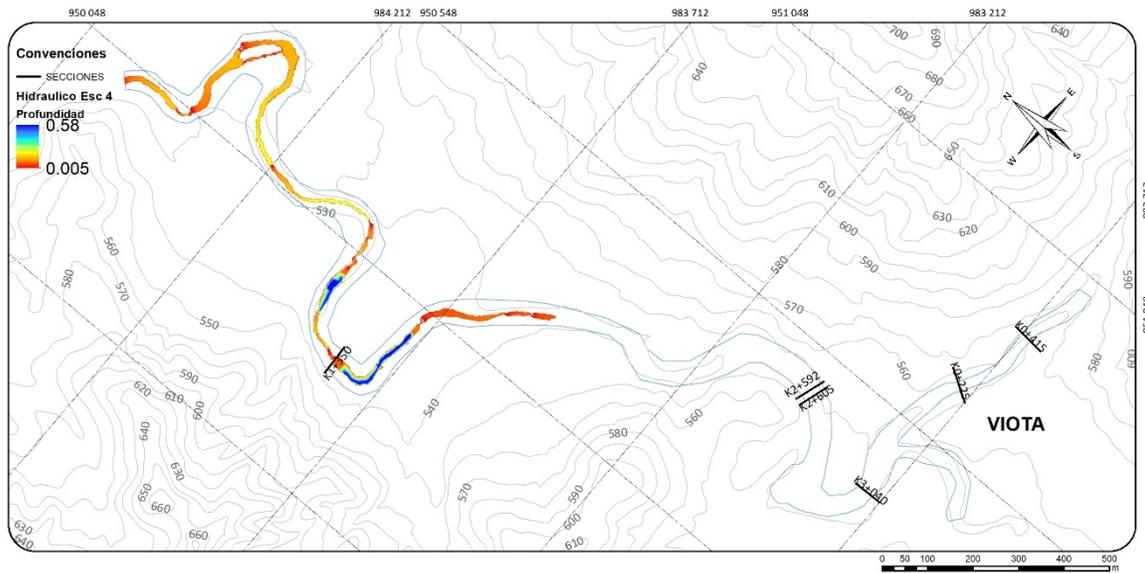


Figura 8-31 Mapa de resultados para la lámina de agua Escenario No. 3 – Río Lindo

8.11.2 DBOC

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene el siguiente valor de DBOC:

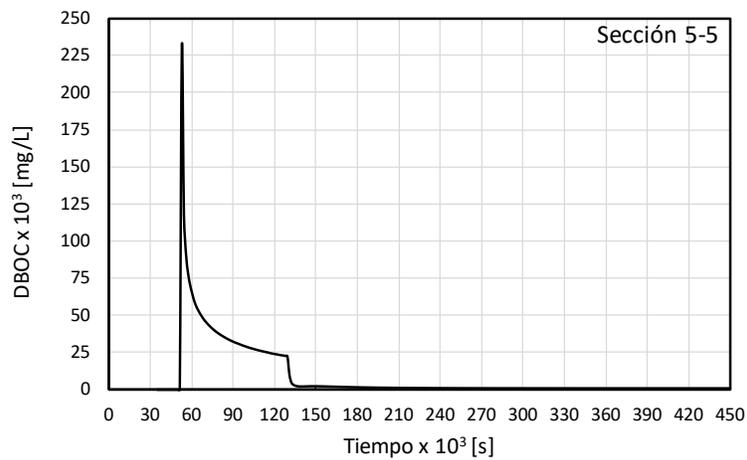


Figura 8-32 DBOC en mg/L Sección 5-5, Escenario 4 Rango total

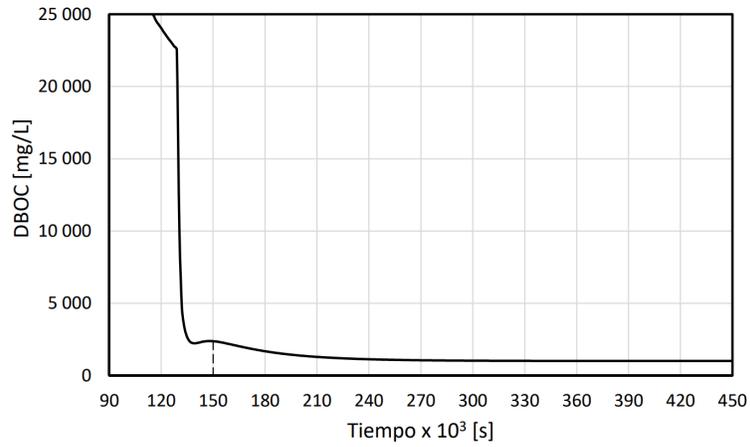


Figura 8-33. DBOC en mg/L Sección 5-5, Escenario 4 Rango > 90k segundos

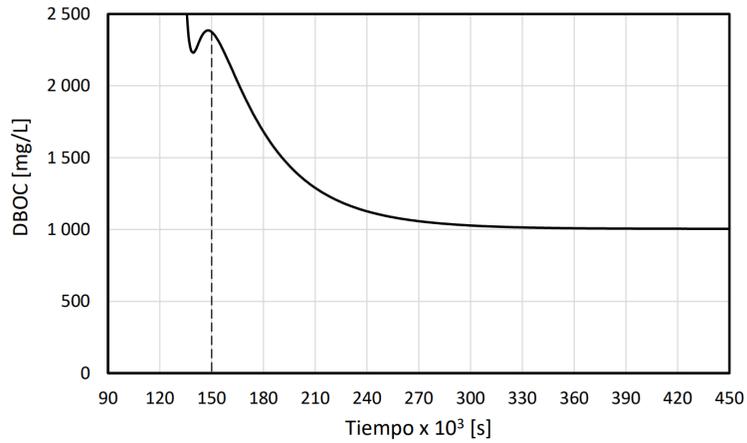


Figura 8-34. DBOC en mg/L Sección 5-5, Escenario 4 Rango > 150k segundos

Como se aprecia en las figuras anteriores, el comportamiento de los valores de la DBOC se divide en tres grandes regiones, los menores a 90k segundos, entre 90k a 150k segundos y los mayores a 150k segundos. Los valores para el parámetro está explicado en que al inicializar el modelo con una DBOC inicial al mallado, y al tener un caudal tan

bajo con respecto a la sección promedio del río, no hay la suficiente masa de agua para que se presenten las correspondientes mezclas y por lo tanto hasta que no se aumente la masa de agua no se aprecian cambios en la disminución de la DBOC, el evento pico se da a los 52.5k segundos y de ahí disminuye muy rápidamente hasta los 120k segundos con un valor de DBOC de 25k mg/L, y de los 120k a los 150k segundos disminuye rápidamente hasta los 2500 mg/L, que corresponde a la entrada de la descarga de la PTAR y se aprecia un aumento ligero hasta que empieza a verse una verdadera mezcla a partir de los 150k segundos, disminuyendo hasta los 1000 mg/L, valor que permanece constante a partir de los 300k segundos.

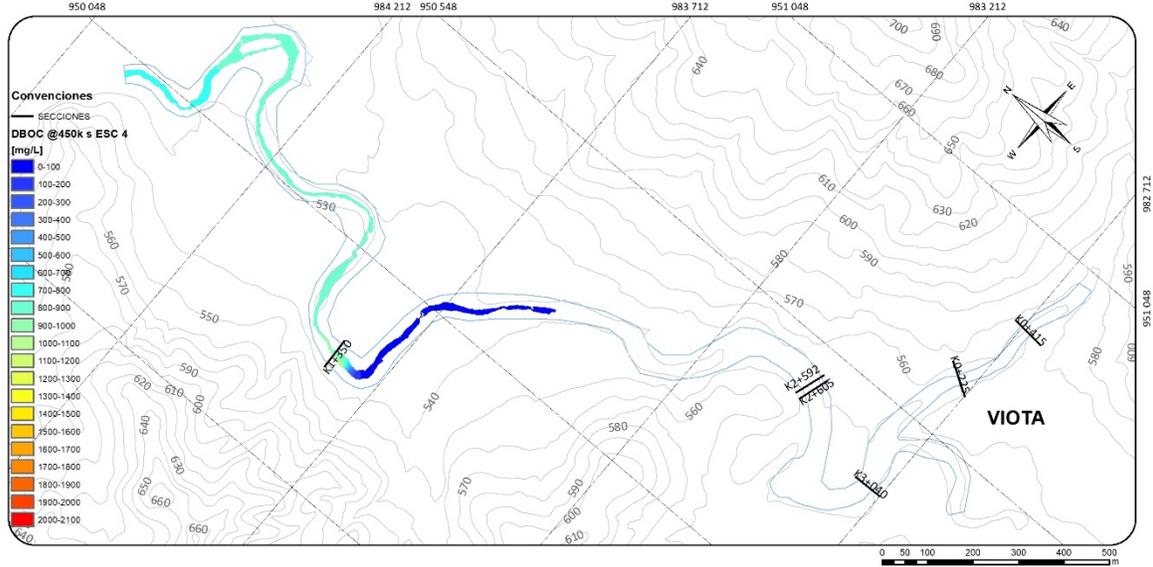


Figura 8-35 Mapa de resultados para DBOC Escenario No. 4 – Río Lindo

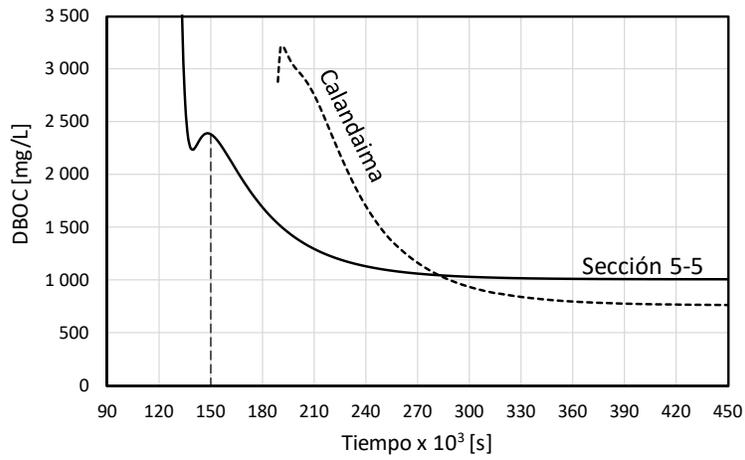


Figura 8-36 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

8.11.3 OD

Para la sección de la zona de la PTAR se obtiene la siguientes valores de OD:

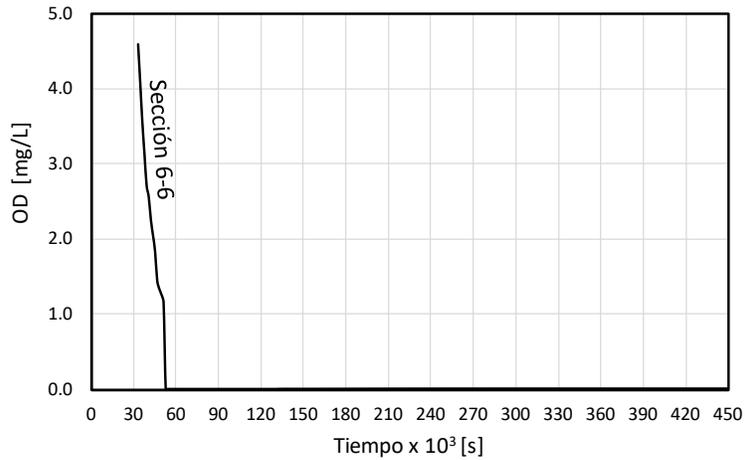


Figura 8-37 OD en mg/L Sección 5-5, Escenario 4

Como se aprecia en la figura, el comportamiento de los valores del OD se estabilizan a los 60k segundos, y con la sección antes de la confluencia podemos observar cómo se recuperan sus niveles de saturación.

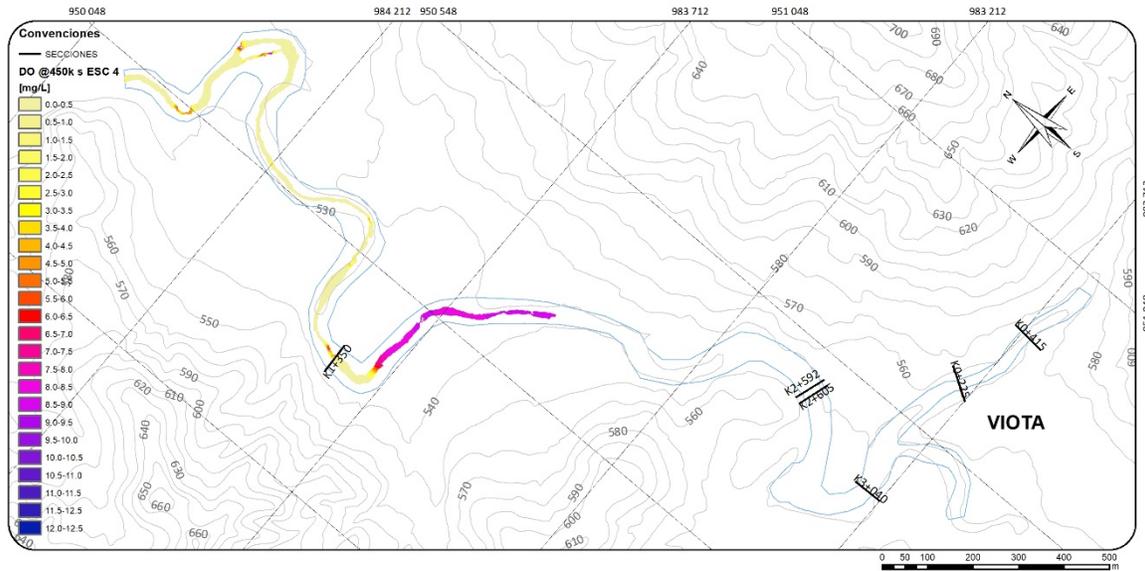


Figura 8-38 Mapa de resultados para OD Escenario No. 4 – Río Lindo

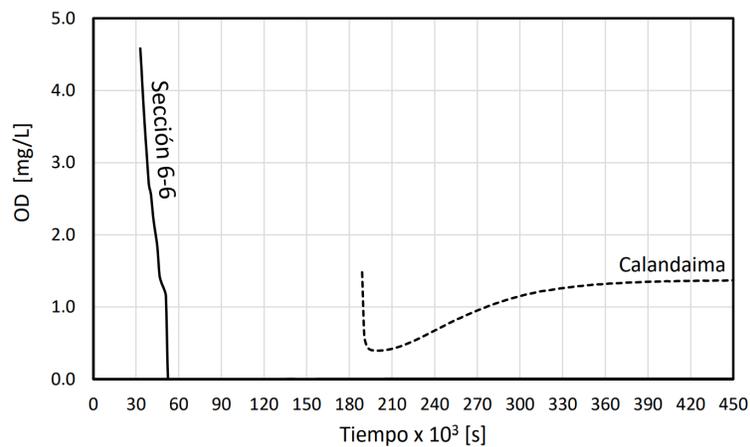


Figura 8-39 Comparativo DBOC – Confluencia Calandaima

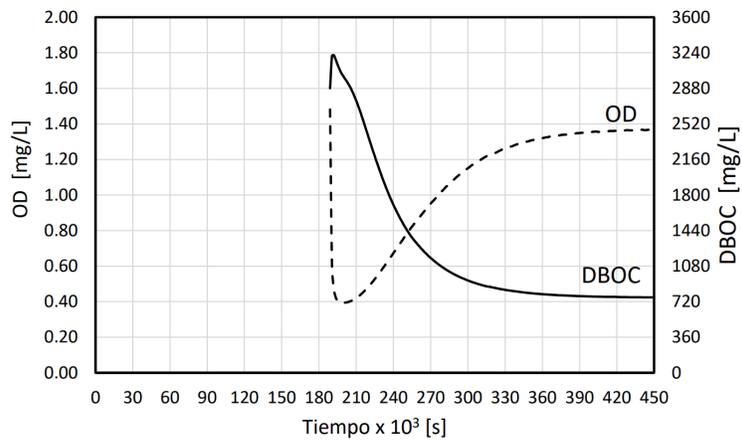


Figura 8-40 Comparativo de OD vs DBOC – Calandaima Escenario 4

9 Conclusiones

9.1 Generalidades

Con el modelo matemático construido en el programa IBER en su versión 2.6 se analizó el comportamiento del contenido de Oxígeno Disuelto (OD) y de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) para diferentes escenarios de caudal y descargas de aguas residuales (AR), para el río Lindo en el municipio de Viotá en el departamento de Cundinamarca, para ello se procedió a la recopilación y análisis de información disponible sobre levamientos topo batimétricos (fuente CAR 2015) del cauce del río Lindo. Además, se llevó a cabo una campaña en campo, en julio de 2018, en la que se realizaron mediciones de caudales (aforos por vadeo), toma de muestras de calidad de agua en el río tomadas, con el apoyo del Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la ECI, en el área en estudio, muestras que fueron procesadas en el laboratorio de aguas del CEA. También se aforaron y tomaron muestras de las descargas de aguas residuales de los sistemas de alcantarillado detectadas. Se realizaron ensayos de trazadores en dos tramos del río. Finalmente se recopilaron registros históricos de las variables hidrológicas y climáticas de la región suministradas por la CAR.

Con la información topobatimétrica se procedió a realizar el modelo geométrico obteniéndose una malla no estructurada de lado mínimo de 1.0 m

Se consultó la normatividad vigente y se determinaron las exigencias para este tipo de modelaciones, donde se especifica que los análisis deben ser realizados para caudales mínimos semanales para un periodo de retorno de 10 años para el río Lindo. Se estableció que la concentración mínima de OD es de 4 mg/L y la DBO_5 debe ser menor a 7.0 mg/L,

Con los resultados de laboratorio obtenidos sobre las muestras tomadas, se definieron valores de los parámetros de OD y DBOUC para las condiciones de frontera y valores iniciales en el modelo. Para la tasa de decaimiento se analizó la evolución de la DBO_5 producto de los análisis de laboratorio realizados sobre las muestras tomadas. Con los

ensayos de trazadores utilizando como sustancia conservativa el NaCl se obtuvo la calibración de la velocidad de mezcla en las diferentes secciones de análisis del cuerpo de agua del río Lindo. A partir de los aforos y mediciones de la lámina de agua se realizó la calibración del coeficiente de Manning como valores de entrada para la calibración hidrodinámica en los sitios de interés del estudio.

Dado que el programa IBER realiza análisis en 2D, resolviendo las ecuaciones de advección difusión con esquemas numéricos donde los cambio en el tiempo son fundamentales las modelaciones se ejecutaron con tiempos superiores a los 450k segundos y con ventanas de 1.5k segundos de salida de datos, obteniéndose soluciones estables. Por otra parte, el tamaño del mallado permite una muy buena aproximación de la morfología del cauce, y garantizó el cumplimiento de condición de Courant. Debido a la morfológica de ríos de montaña, que presenta el río Lindo, con presencia de rocas de variados tamaños hasta de más de 1.0 m, con grandes irregularidad en la sección a lo largo del tramo de análisis, esto implicó un coeficiente de Manning con valores relativamente altos a los que normalmente se utilizan. Para el tramo denominado río Lindo arriba el valor del coeficiente de Manning calibrado fue de 1.487, en el tramo de la quebrada la Pilama el coeficiente de Manning fue de 2.762 y del tramo desde la confluencia de la Pilama y río Lindo hasta la desembocadura con el río Calandaima fue de 0.145.

A continuación, se presentan las conclusiones de cada uno de los escenarios modelados, condicionados a la verificación de la calidad en la sección de control de la PTAR y la confluencia con el río Calandaima.

9.2 Escenario No. 1

Este escenario corresponde es el de calibración hidrodinámica y de calidad del modelo, trabajado con las condiciones actuales de descargas y caudales medidos en campo. Se modeló hasta los 300k segundos.

Se concluye que para la época de estiaje (julio – agosto) cuando se tomaron las diferentes mediciones de caudal, el río Lindo tiene una buena capacidad de asimilación en donde para la sección de control se obtuvieron valores máximos de DBOC de 47 mg/L, que traducidos como DBO_5 corresponde a:

$$DBO_5 = 5.0(1 - e^{-0.0162 \cdot 5})$$

$$DBO_5 = 0.40 \text{ mg/L}$$

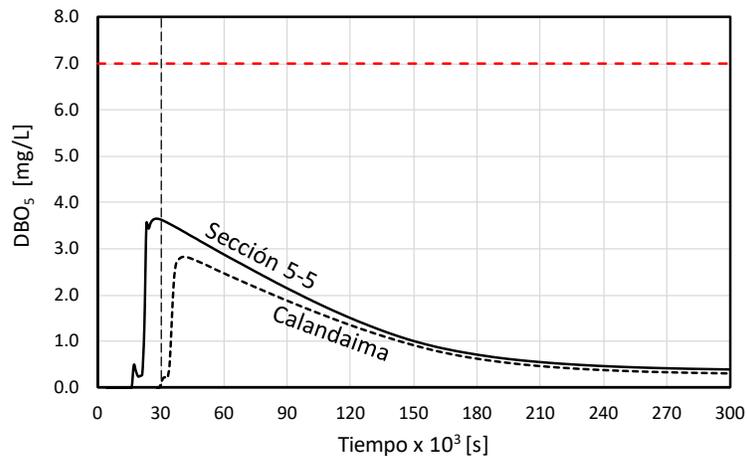


Figura 9-1 Comparativo DBO_5 – Escenario 1

En cuanto al OD, el valor obtenido de 7.8 mg/L, indica que el cuerpo de agua está casi a nivel de saturación. Comparando esto resultados con las normas vigentes se concluye que para los caudales modelados en este escenario el río presenta una completa asimilación de las descargas identificadas en el tramo de análisis.

De igual forma en la zona de confluencia entre el río Lindo y el río Calandaima se obtuvo prácticamente nivel de saturación en el parámetro del OD con un valor de 8.0 mg/L. y un valor muy bajo del DBOC en unos 4.1 mg/L que corresponde a una DBO_5 de 0.3 mg/L

9.3 Escenario No. 2

Este escenario corresponde al análisis de la condición extrema de caudales mínimos para un periodo de retorno de 10 años, en donde para la sección de control de la PTAR, se obtuvieron valores de DBOC de 84 mg/L, que corresponde a una DBO₅ de 6.5 mg/L, valor menor a lo solicitado por la normatividad vigente (CAR, <7 mg/L). y prácticamente a nivel de saturación de OD en unos 7.4 mg/L. Se modelo hasta los 300k segundos.

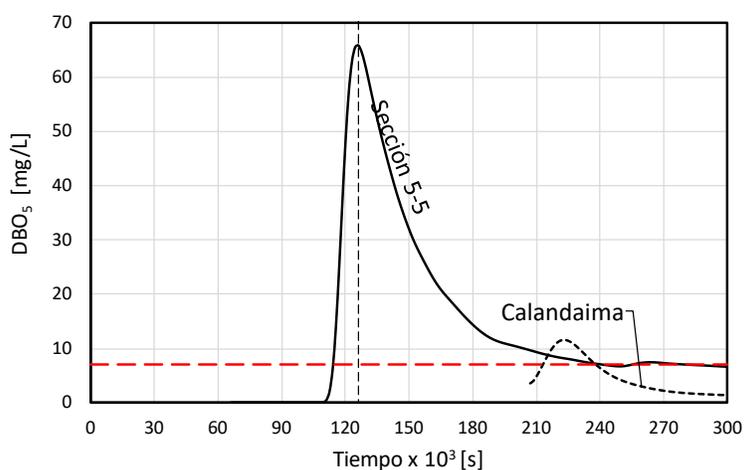


Figura 9-2 Comparativo DBO₅ – Escenario 2

De igual forma en la zona de confluencia entre el río Lindo y el río Calandaima se obtuvo prácticamente nivel de saturación en el parámetro del OD con un valor de 8.0 mg/L. y un valor de DBOC en unos 17.2 mg/L, correspondientes a unos 1.7 mg/L de DBO₅.

9.4 Escenario No. 3

Este escenario corresponde al análisis de la condición extrema de caudales mínimos para un periodo de retorno de 10 años, y aumentando los caudales de las descargas en proporción al crecimiento población para una ventana de 25 años, encontrándose en la

sección de la PTAR una DBOC de 139 mg/L, correspondiendo a una DBO₅ de 11 mg/L valor por encima de la normatividad vigente (CAR, <7 mg/L). Se modeló hasta los 600k segundos.

El OD en esta sección dio casi cero, indicando que por el aumento de la carga contaminante y teniendo tan bajo los caudales para el cauce del río, no permitió que existiera una diferencia másica de agua que permitiera la recuperación del nivel de oxígeno en esta sección.

De igual forma en la zona de confluencia entre el río Lindo y el río Calandaima se obtuvo prácticamente nivel de saturación en el parámetro del OD con un valor de 8.0 mg/L. y un valor de DBOC en unos 22.6 mg/L, correspondientes a unos 1.8 mg/L de DBO₅.

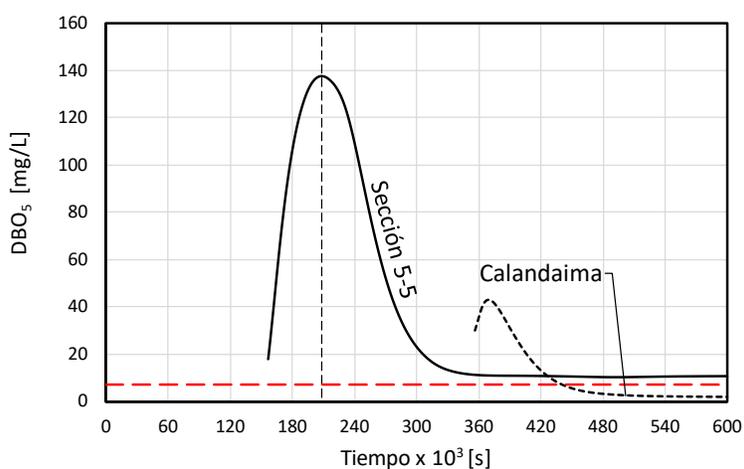


Figura 9-3 Comparativo DBO₅ – Escenario 3

9.5 Escenario No. 4

Este escenario corresponde al análisis de la condición extrema de caudales mínimos para un periodo de retorno de 10 años, y dejando una única descarga en la sección de la

PTAR, encontrándose en esta sección una DBOC de 1005 mg/L, correspondiendo a una DBO_5 de 78 mg/L valor por encima de la normatividad vigente (CAR, <7 mg/L). Dado el antecedente del escenario anterior, y para acortar los tiempos de modelado se recortó el modelo dado que ya no se tenían las descargas en la zona del casco urbano del municipio de Viotá y se modeló aproximadamente la mitad del cauce en un tiempo de 450k segundos.

Al igual que para el escenario 3, el valor modelado de OD es casi cero, indicando que no hay el suficiente caudal para realizar la recuperación de oxígeno disuelto en la zona de la PTAR, pero que al revisar en la sección de la confluencia se encontró un valor de OD de 1.4 mg/L.

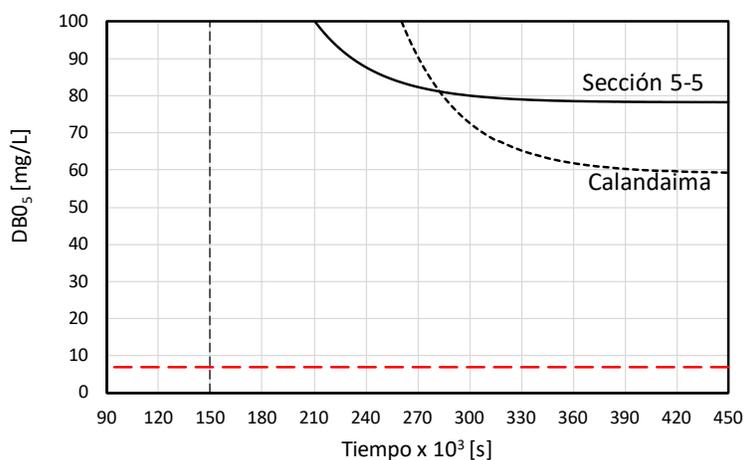


Figura 9-4. Comparativo DBO_5 – Escenario 4

9.6 Conclusiones

1. Las primeras corridas fueron realizadas con la versión 2.5 que aunque ya tenía el módulo del IBER Plus, que permitía realizar corridas en paralelo utilizando el motor de la tarjeta de video del equipo (arquitectura CUDA), no realizaba corridas para modelos

de calidad de agua, razón por la cual, las modelaciones iniciales de calidad, aún con tiempos menores a 30k segundos, y dependiendo de la cantidad de parámetros modelados con el motor normal del IBER se llegaban a corridas de hasta 10 días seguidos. En mayo de 2021 IBER presentó en la versión 2.6 el motor de IBER Plus con cálculos en paralelo para los modelos de calidad, de tal forma que las corridas pasaron de días a horas, favoreciendo enormemente la obtención de resultados y la verificación de parámetros específicos de modelación, como número de Courant, valores límites de capa de turbulencia, de límites secos, etc.

2. Es de suma importancia que los parámetros para la modelación sean obtenidos a partir de campañas de medición, muestreo y ensayos de laboratorio, para con ellos alimentar el modelo matemático montado en IBER, con ello, no realizar supuestos de algunos parámetros y tasas requeridos en el modelo y así obtener resultados que están basados en datos reales y contar con un modelo calibrado.
3. Con el uso del programa IBER, se logró realizar adecuadamente la modelación de caudales muy pequeños para el tamaño de la sección del cauce del río Lindo. Por lo robusto del algoritmo implementado, el programa realiza ajustes en parámetros como el número de Courant y el límite para el cálculo de límite seco a mojado, condición que garantiza modelaciones bajo estas características extremas.
4. Los tiempos de modelado de hidrodinámico a modelado incluyendo calidad del agua se aumentan drásticamente, pues se pasaron de tiempos de modelado de 30k segundos a corridas de hasta los 600k segundos, teniendo en cuenta todos los efectos del transporte por advección y difusión de las sustancias no conservativas, para caudales tan pequeños, con secciones del cauce en promedio muy pequeñas y efectos de vorticidad (Coriolis) y de turbulencia en el modelo de calidad, para obtener resultados en todas las secciones del modelo.
5. Para los escenarios 1 a 2 se concluye que el cuerpo de agua tiene capacidad de asimilación de las cargas contaminantes a la altura de la sección de la PTAR.

6. Para los escenarios 3 y 4, escenarios futuros, en los que se prevé aumento de los caudales vertidos y en las cargas contaminantes, el cuerpo de agua, en épocas de estiaje, no tendrá capacidad de asimilación de la carga contaminante. Se destaca especialmente que el OD, que en ambos casos presentó valores cercano a cero, indica que el cuerpo de agua no puede asimilar estas descargas, alcanzando condiciones sépticas.
7. Con respecto al parámetro de la DBO_5 , los escenarios 1 a 3 a la altura de la sección final del modelo (confluencia con el Calandaima), cumplen normativamente de que sea menor a 7.0 mg/L.
8. Para el escenario 4, el parámetro de la DBO_5 , a la altura de la sección final del modelo no cumple normativamente, presentando valores de 60 mg/L de este parámetro.

10 Recomendaciones

1. Utilizar el módulo de IBER Plus para las modelaciones de calidad de agua, ya que con el presente trabajo de grado, se corroboró su gran potencial en la obtención de resultados confiables, con estabilidad de los resultados producto de las corridas.
2. Se recomienda realizar un manual de modelación base para la utilización del software IBER en la modelación de calidad del agua, dado que existe la guía nacional de modelación de calidad de aguas continentales (lenticas y lóticas), pero por su carácter general, no especifica actividades y procedimientos que son de vital importancia para la construcción de un correcto modelo de calidad de agua, en donde se recomienda hacer énfasis en la planificación de las actividades de campo, y de laboratorio necesarias para construir modelos que sean efectivos como herramientas para la gestión de la calidad de nuestro recurso hídrico.
3. El resultado de la modelación del escenario 4 indica que si el efluente de la PTAR cumple con la normatividad con descargas que tengan concentraciones de DBO_5 menores o iguales a 90 mg/L para conservar el OD en el río, por encima de los 4 mg/L.
4. Los resultados del escenario 4, indican un estrecho margen de maniobrabilidad para el aumento de los caudales de la PTAR y el municipio de Viotá, condición que hacia adelante en el tiempo, con el caudal mínimo del río Lindo, no podrá manejar, por lo tanto se recomienda trasladar la PTAR aproximadamente a un kilómetro aguas abajo de la confluencia del Calandaima y el río Lindo, de tal forma que los aportes de caudales mínimos que lleguen de estas dos corrientes, ayuden a mejorar el proceso de asimilación de la carga contaminante de la PTAR.
5. En concordancia con el punto anterior, se recomienda se amplié el presente estudio para realizar una segundo modelo con su respectiva campaña de trabajo en campo como tema de un trabajo de grado, que permita realizar un modelo de calidad del río Calandaima, modelando desde la confluencia del río Lindo hasta la desembocadura

con el río Bogotá, para determinar la ubicación óptima de la PTAR, para que se cumpla la normatividad vigente en lo que respecta a la asimilación de la carga contaminante que transportan estas dos corrientes más los aportes de la PTAR y el municipio de Viotá se pueda seguir desarrollando hacia el futuro.

11 Referencias

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. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

ANLA Autoridad Nacional de licencias ambientales (2013). Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial. Bogotá D.C.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30(1) pp.1-10.

Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C. & Chamberlin, C. (1985). Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Edition). U.S. Environmental Protection Agency. CAR & EPAM S.A. ESP (2016).

Camacho, L. (2020). Procesos y modelos de transporte de solutos y experimentos con trazadores. Universidad de los andes.

Cañón J. (2005). Determinación del coeficiente de degradación de materia orgánica carbonácea en río de montaña. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9187/u275509.pdf>.

CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2003). Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Calandaima. Contrato 2120 de 2003. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac2572fe88aa.pdf>, <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac256b4687e5.pdf>

CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2003). 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). Bogotá, D.C.

CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2015). Consultoría para elaborar estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, inundación, avenida torrencial e incendios forestales en los municipios priorizados en la jurisdicción de la corporación autónoma regional de Cundinamarca –CAR– Contrato 1185/13. Generalidades municipio Viotá. https://catalogo.car.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=57531&query_desc=an%3A472.

CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2015). Ejecutar los estudios y diseños para realizar el manejo integral de la cuenca de la quebrada Pilama, quebrada San Juana y río Lindo en el departamento de Cundinamarca. Contrato 1421 de 2014. Informes Fase I y II.

Castañó, J. (2015). Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

Chapra, S. (1997). Surface Water Quality Modeling. Nueva York: McGraw-Hill Companies, Inc.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. Nueva York: McGraw-Hill.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2018). Censo General 2018. Municipio de Viotá, Cundinamarca.

Díaz, M. B. E. (2004). Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo – Canoas. Bogotá: Universidad de los Andes. <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/modelacion-de-la-calidad-del-agua-en-el-interceptor-rio-bogota-en-los-tramos-fucha-tunjuelo-canoas>.

García Ma., Ruiz V. (2018) Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en dos dimensiones del cuerpo hídrico léntico zona sur del humedal Capellanía, localidad de Fontibón, Bogotá D.C. Colombia con el software IBER. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/14308>.

García-Leal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J.M., and Fornella, A., 2018. An accelerated tool for flood modelling based on Iber. Water 2018, 10(10), 1459. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/10/1459>

IBER. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas, Manual de referencia hidráulico (2014). <https://www.iberaula.es/space/54/downloads>.

IBER. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas, manual de referencia del módulo de calidad de aguas (2015). <https://www.iberaula.es/space/54/downloads>.

Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales IDEAM (2007). Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría, Manual y procedimientos de laboratorio. Version 2.

Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales IDEAM (2020). Portal de datos abiertos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano>.

Instituto Nacional de Ecología (1977) Metodología para determinar las constantes de desoxigenación (Kd), remoción de DBO (Kr) y reoxigenación (K2) en una corriente. AE 003001. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales República de México.

Jiménez A., Matamoros H. (2018). Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, N° 112. Bogotá D.C., Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales Bogotá, D.C. Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 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). Bogotá D.C. Colombia.

Raffo L, Ruiz L (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Revista de la Facultad de Ingeniería Industria Universidad Nacional Mayor de San Marcos Perú.

Romero Rojas, J. (2005). Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales. Bogotá: Colombia, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero Rojas J. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002. Tercer Edición.

Sierra, C. (2011). Calidad del agua: Evaluación y Diagnóstico. Ediciones de la U. Medellín.

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.

UNAL & EAAB. (2008). Modelación dinámica de la calidad del agua del río Bogotá: EAAB, Universidad Nacional de Colombia, Contrato Interadministrativo 9-07-26100-1059 de 2008.

Vargas, J., Rivera, L., Salazar, A., Robledo, V. y Chang, P (2019). Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, IBER y FLOW 3D en la simulación hidráulica de un meandro en Colombia. UNAL – Manizales.

Viotá Alcaldía municipal. (2016). Por medio del cual se adopta el plan de desarrollo municipal del municipio de Viotá para el periodo constitucional 2016-2020 denominado “Viotá Territorio Seguro, Competitivo e Incluyente. [Acuerdo 007 de 2016].

12 Anexos

Anexo 1 Modelo Calidad (IBER V.2.6)

ESCENARIO 1

ESCENARIO 2

ESCENARIO 3

ESCENARIO 4

RASTER

SECCIONES

VIDEO

Anexo 2 Datos de Campo

Anexo 3 FOTOS

Anexo 4 MAPAS

Anexo 5 HOJAS DE CÁLCULO

Anexo 6 ESTUDIO HIDROLÓGICO Y POBLACIONAL

Anexo 7 CORRIDAS DEL MODELO (VIDEO)

ESCENARIO 1 DBOC

ESCENARIO 2 DBOC

ESCENARIO 3 DBOC

ESCENARIO 4 DBOC

Los anexos están en formato digital.

Maestría en Ingeniería Civil



Estudio y modelamiento de la calidad del agua del río Lindo, municipio de Viotá en el
Departamento de Cundinamarca, Colombia

ANEXO: Estudio Hidrológico y Proyección de Población

Everth Aníbal Vizcaino Godoy

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., 29 de julio de 2021

1 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 datos que aporta la cuenca para simular el comportamiento haciendo el cambio de la precipitación, para el análisis de la información se utilizaron archivos tipo ráster¹, determinando sus características geomorfológicas para el análisis.

Se tuvo la condición de época de estiaje y por lo tanto las condiciones eran favorables para hacer las mediciones de los caudales en campo. 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 1-1

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.
8. Cuenca de la Q. San Juan

¹ Raster: 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.

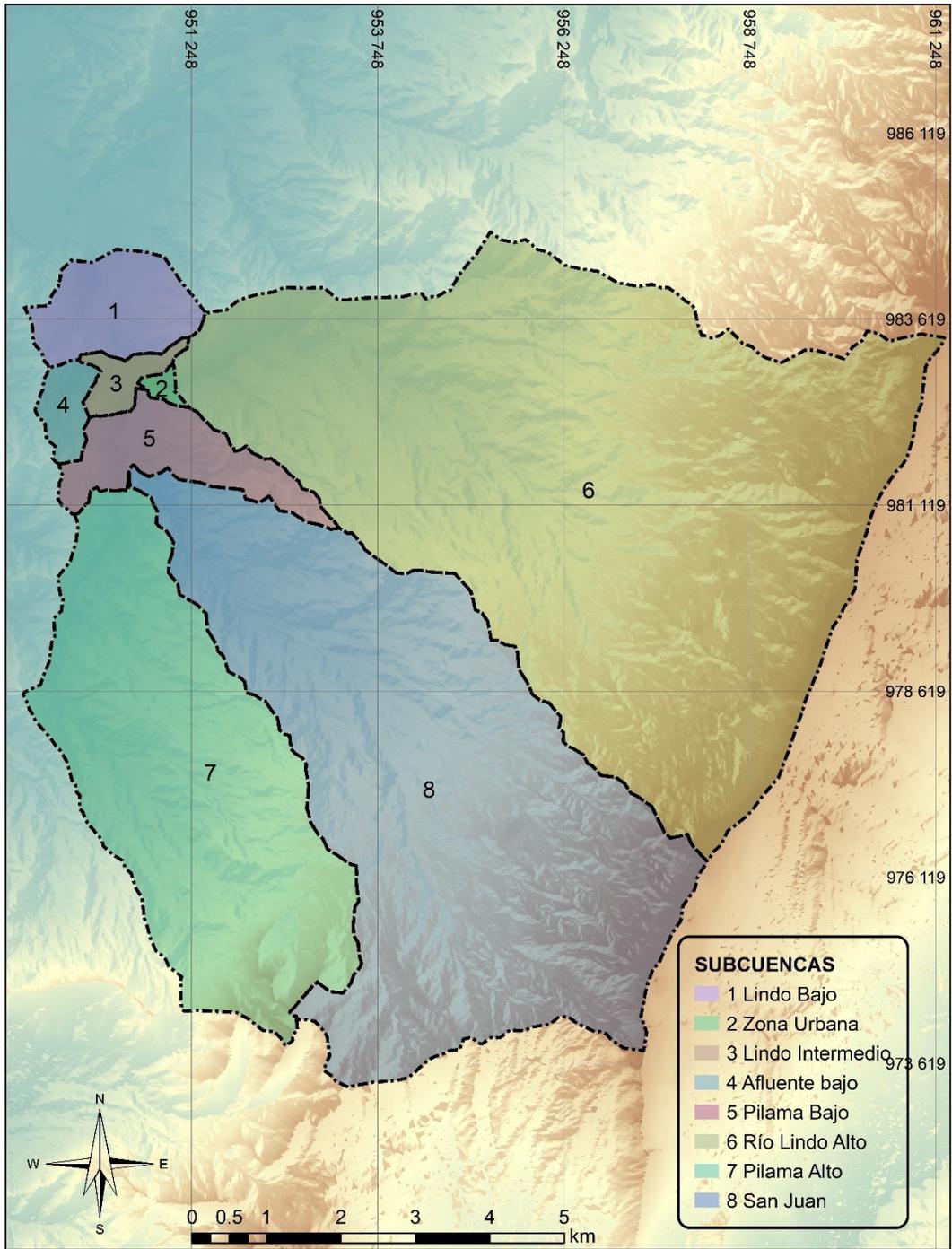


Figura 1-1 Subcuencas Río Lindo

1.1 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 y el método requiere la definición de las siguientes condiciones:

Tabla 1-1 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 9-6
3	Condición Hidrológica	Ver tabla 9-7
4	Condición de humedad antecedente.	AMC - II

Fuente elaboración propia

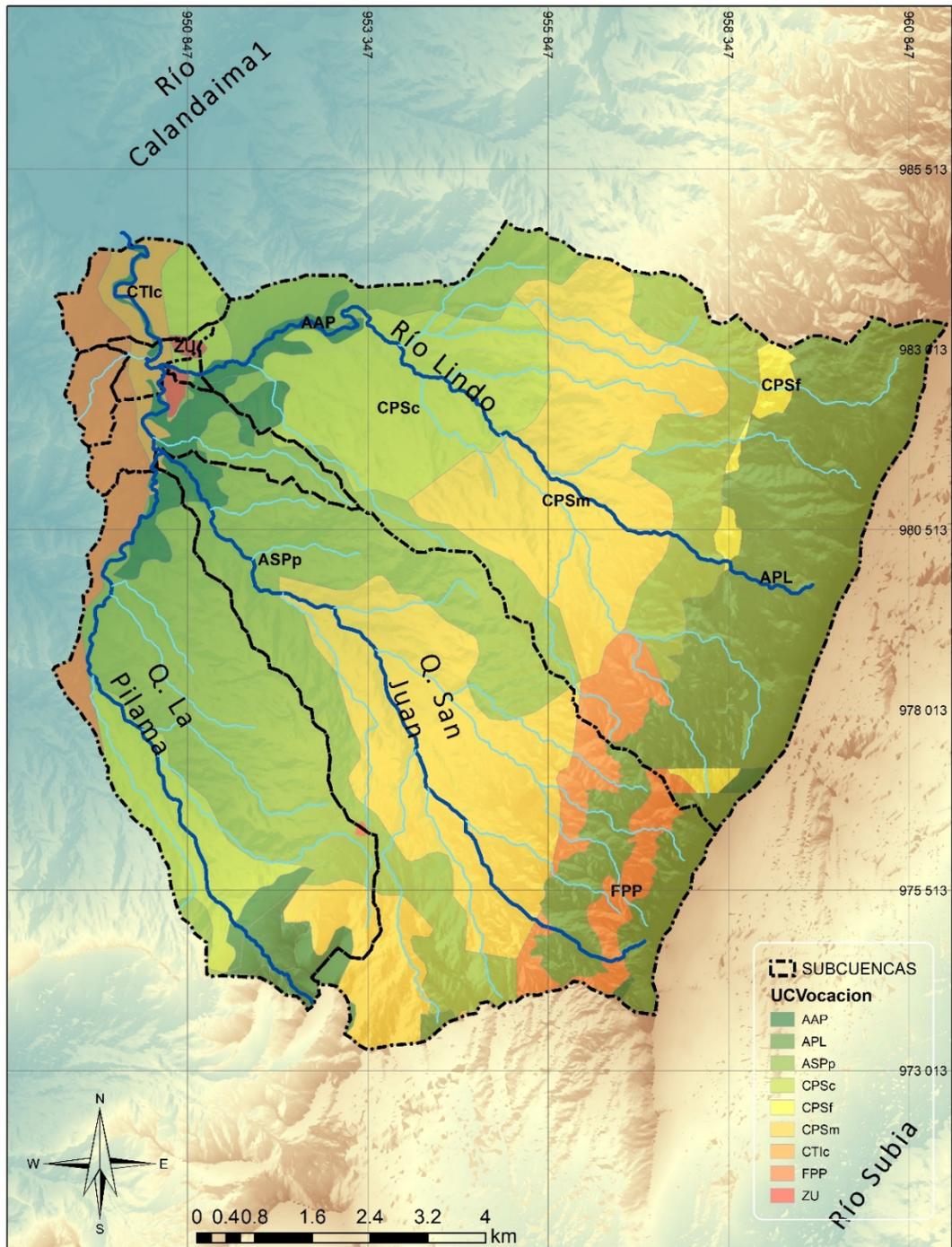


Figura 1-2 Distribución de usos del suelo y tratamiento del suelo

1.1.1 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 ², 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.

1.1.2 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. Ver Figura 1-2.

Tabla 1-2 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
CPSf:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima frío	746.32	324.77		1071.09
CPSm:	Cultivos permanentes semi intensivos de clima medio	1082.63	92.63	1235.47	2410.73

² 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
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

1.1.3 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 1-3 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 frío	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

1.2 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 1-3
2. Pendientes del terreno (geomorfología), ver Figura 1-4
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.

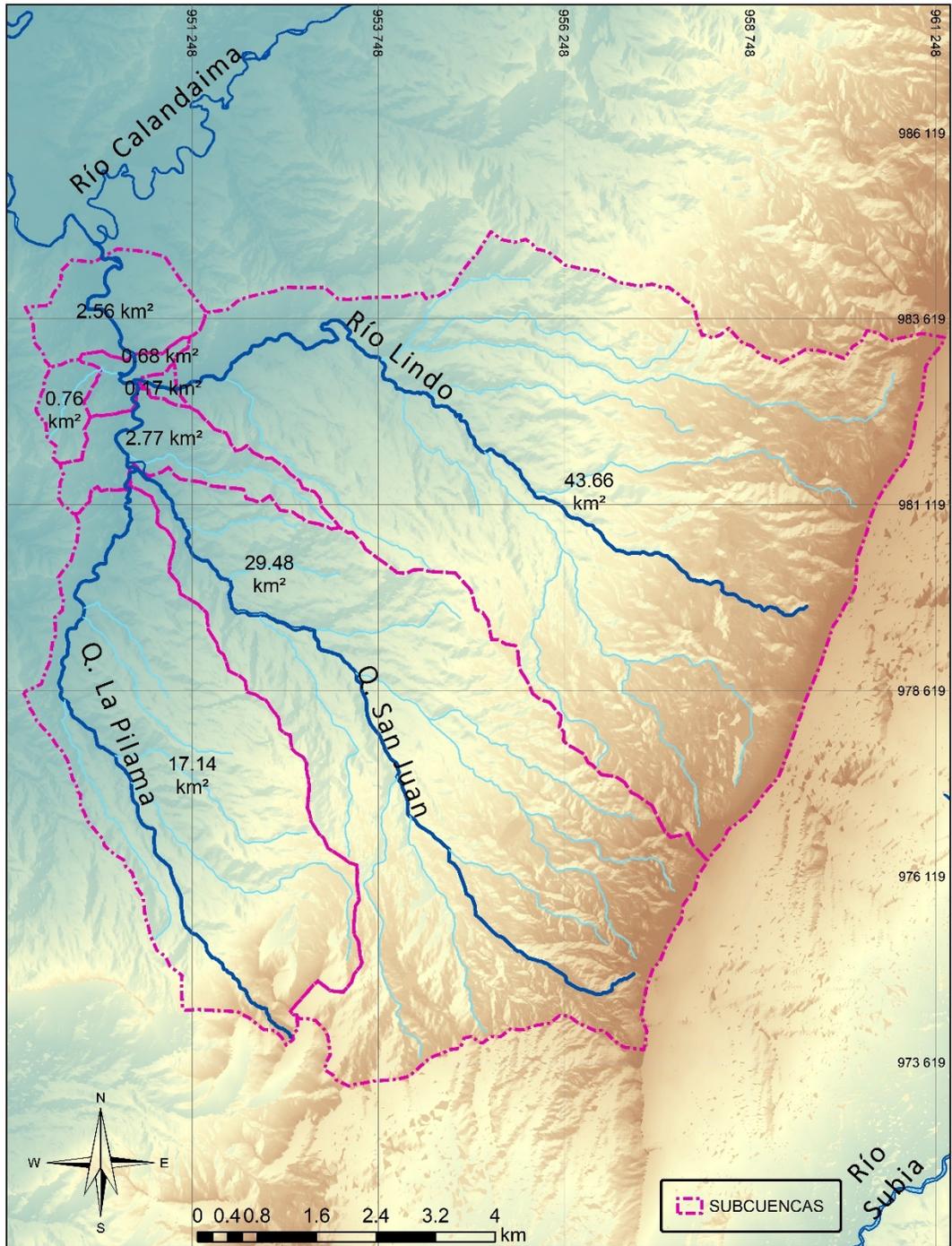


Figura 1-3 Áreas de las subcuencas Río Lindo

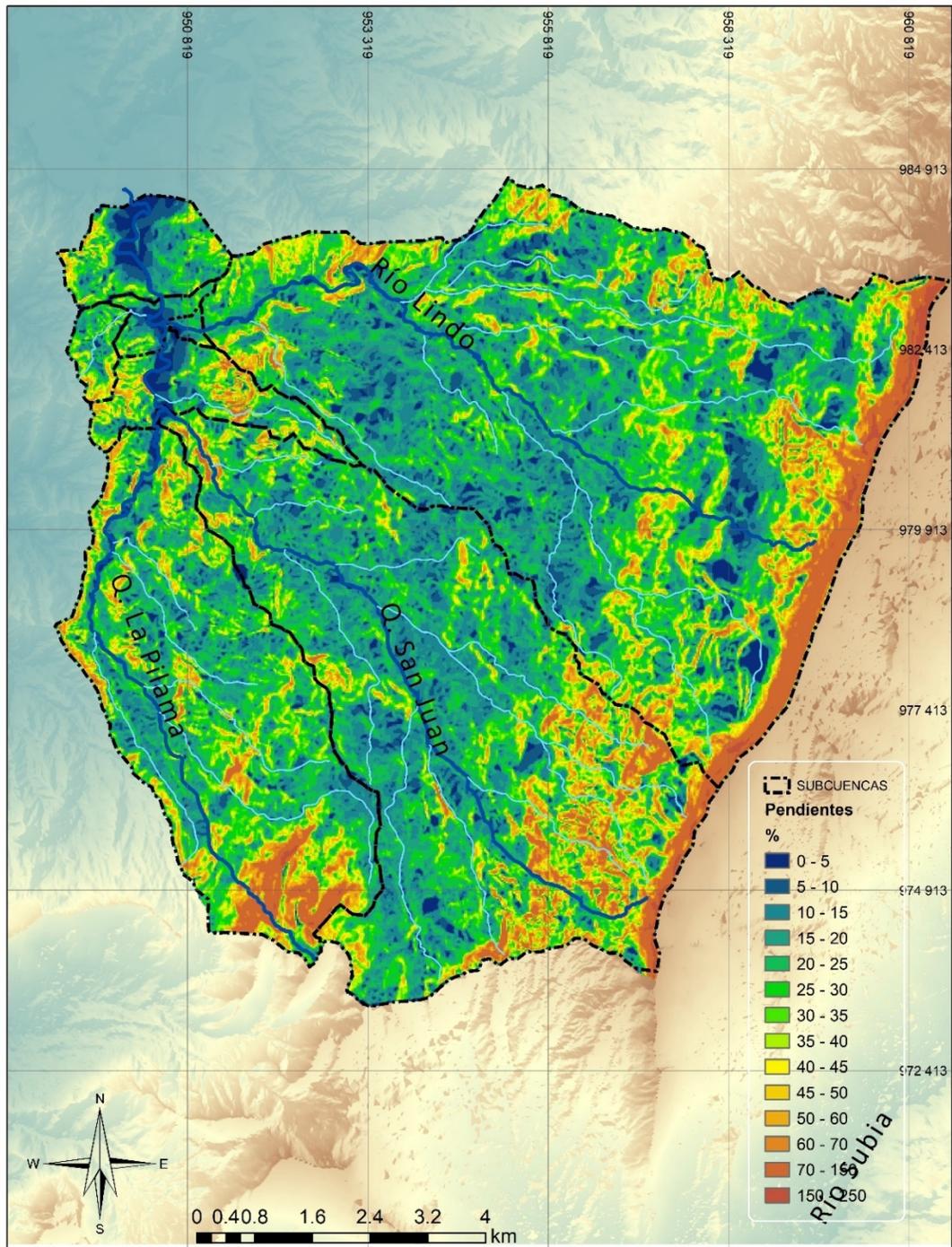


Figura 1-4 Distribución espacial de pendientes en la cuenca del Río Lindo

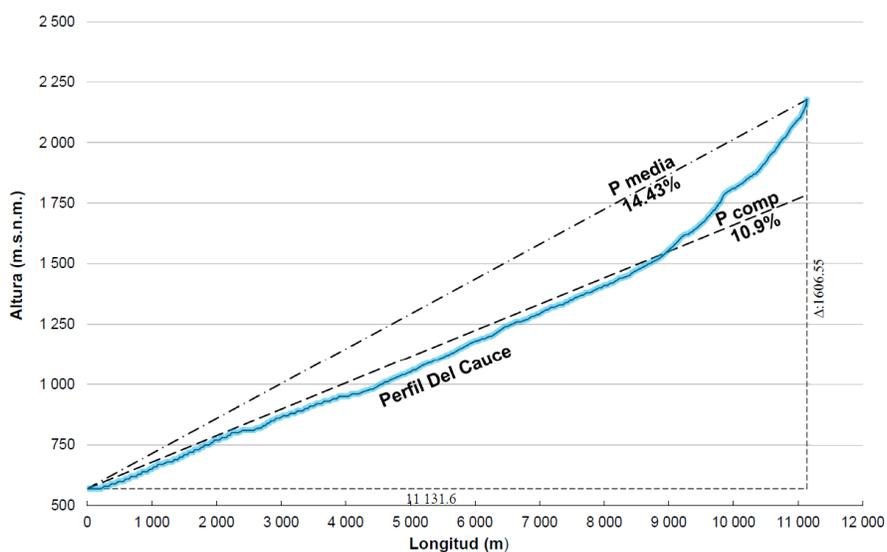


Figura 1-5 Pendiente cauce media y compensada del Quebrada San Juan

Tabla 1-4 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

k	Pendiente %	Ocurrencias	% Ocurrencia	% Acumulado	Pendiente media del intervalo	Ponderado [%]
25	120 - 125	60	0.08%	0.63%	122.50%	74
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 elaboración propia

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

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

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

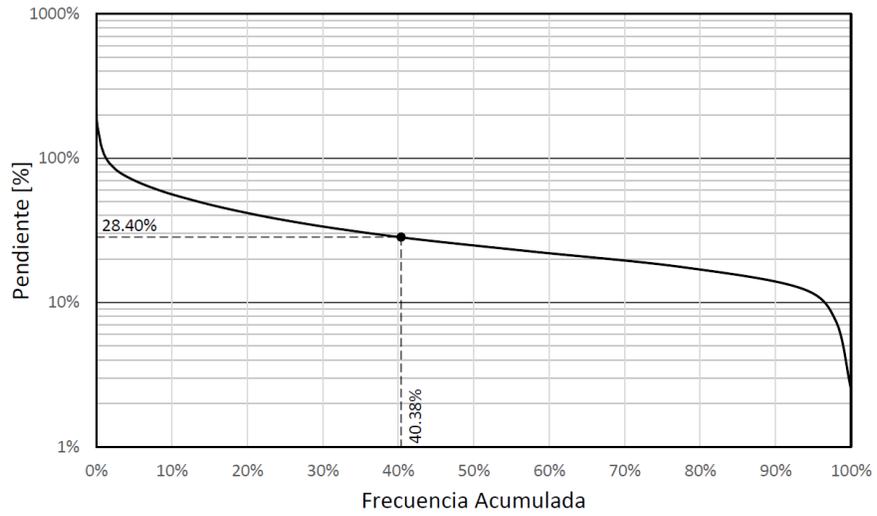


Figura 1-6 Pendiente media de la cuenca de la Q. San Juan

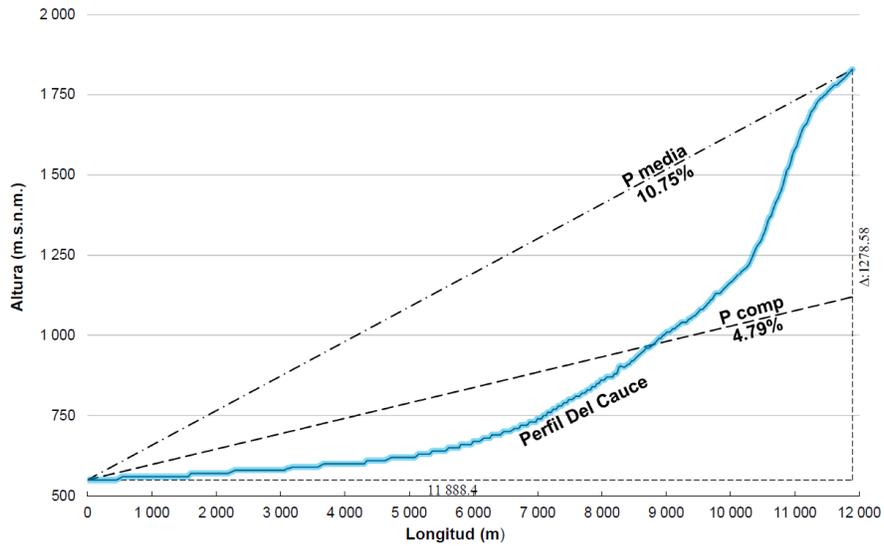


Figura 1-7 Pendiente media y compensada del cauce Q. La Pilama

Tabla 1-5 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 elaboración propia

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

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

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

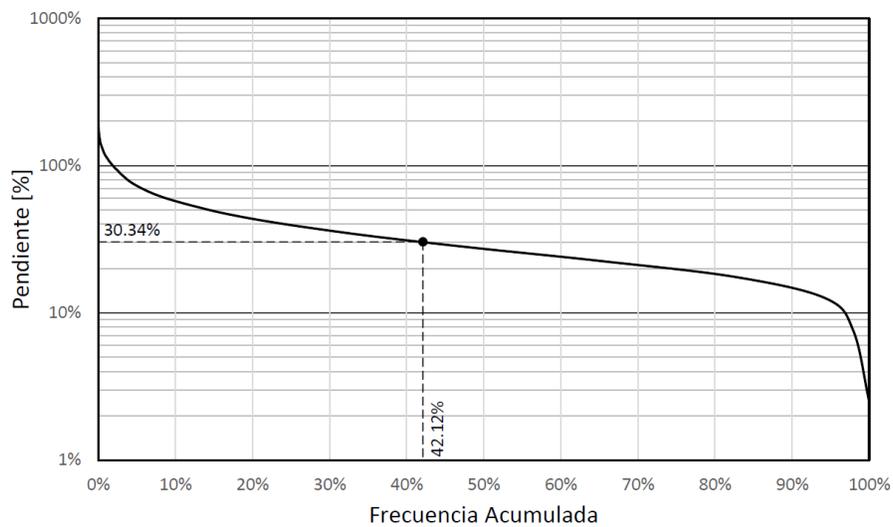


Figura 1-8 Pendiente media de la cuenca de la Q. La Pilama

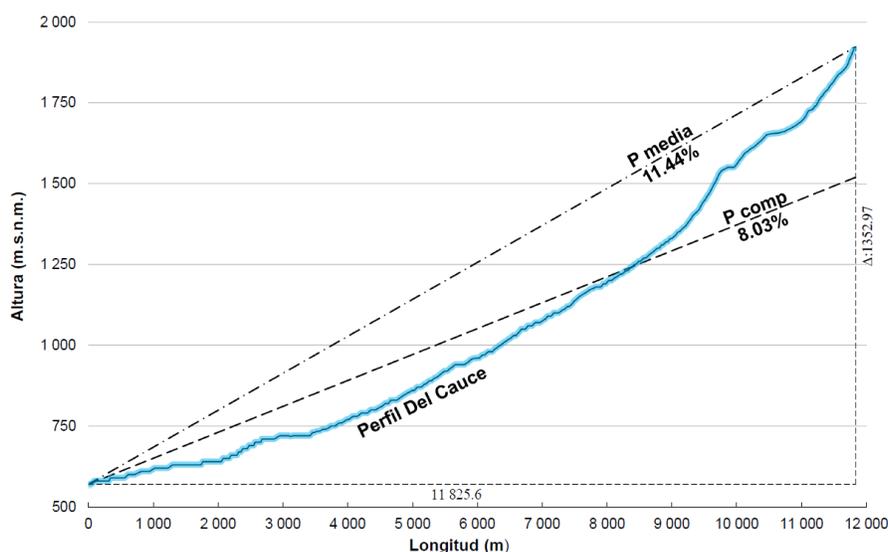


Figura 1-9 Pendiente media y compensada del cauce Río Lindo

Tabla 1-6 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

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

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

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

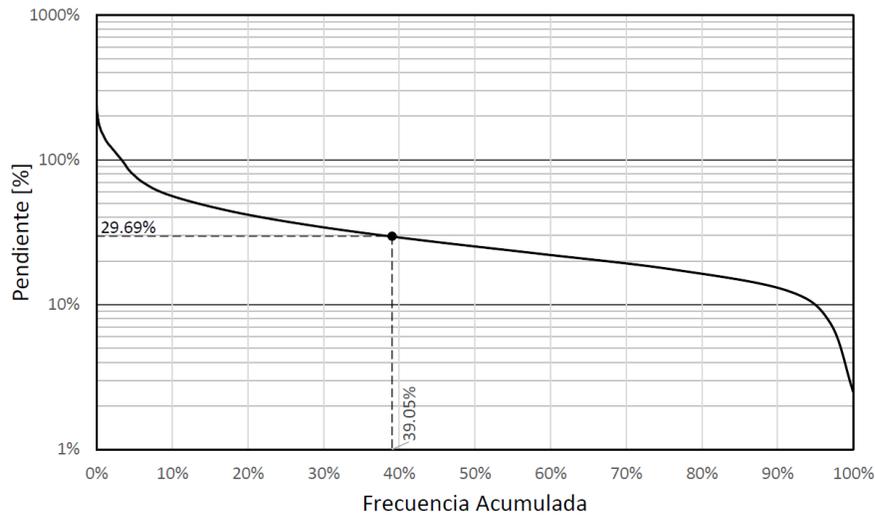


Figura 1-10 Pendiente media de la cuenca del Río Lindo

1.2.1 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.

1.2.2 Número de Curva

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

Tabla 1-7 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

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

Tabla 1-8. Cálculo de número de curva por cuenca ponderado por área

Unidad	Número de Curva	Río Lindo [ha]	Q. Pilama [ha]	Q. San Juan [ha]
AAP	70	2.00	8.75	1.56
APL	70	19.77	0.00	9.25
ASp	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
FPP	70	2.08	4.38	6.18
ZU	91	0.03	0.08	0.03
Ponderado		75.79	75.87	76.23

1.3 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 1-9 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

¹Cuenca aguas arriba del punto de control de la piscina

1.3.1 Tc de la Q. San Juan

Tabla 1-10 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
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 elaboración propia

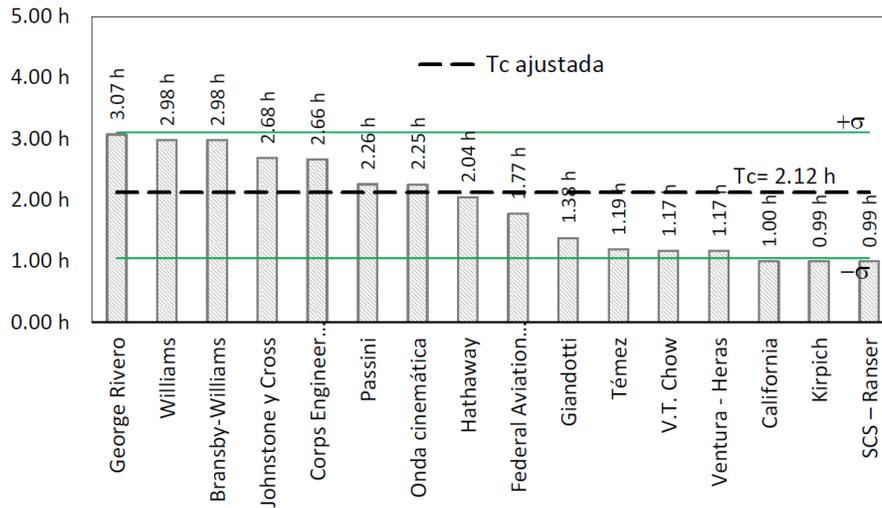


Figura 1-11 Tiempo de Concentración de la cuenca Q. San Juan

1.3.2 Tc de la Q. Pilama

Tabla 1-11 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
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

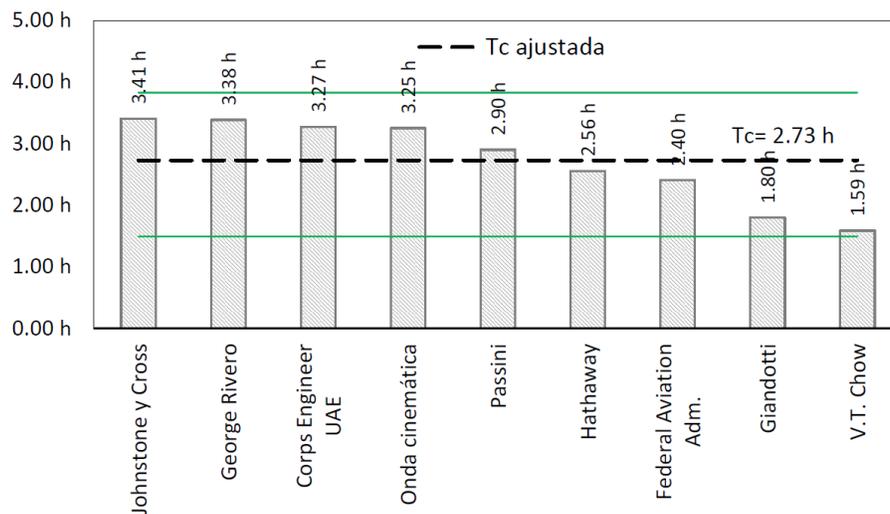


Figura 1-12 Tiempo de Concentración de la cuenca Q. Pilama

1.3.3 Tc del Río Lindo

Tabla 1-12 Tiempo de Concentración cuenca Q. San Juan

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
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

Método	Tc [h]	Tc [hh:mm]
SCS – Ranser	1.17 h	01:10
Promedio	2.18	02:10

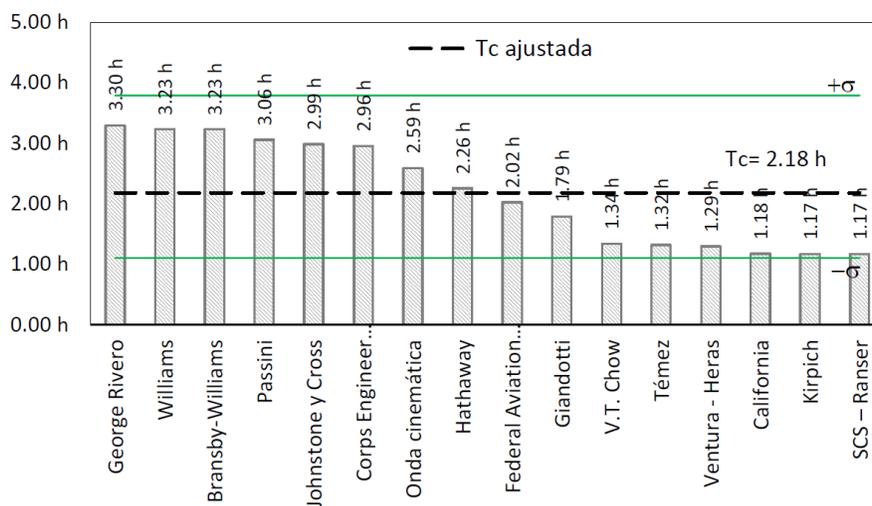


Figura 1-13 Tiempo de Concentración de la cuenca Río Lindo

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

1.4 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

1.5 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.

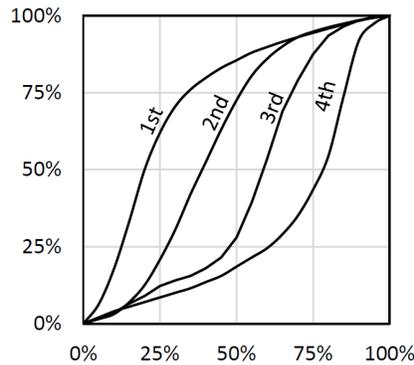


Figura 1-14 Distribución unitaria de Lluvia tipo Huff

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

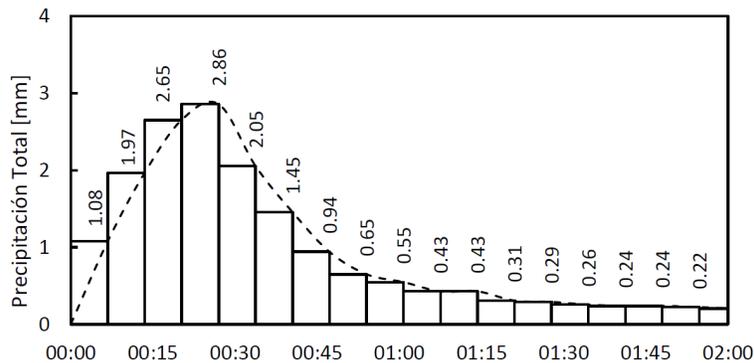


Figura 1-15 Precipitación proyectada cuenca Río Lindo

1.6 Modelo hidrológico

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

Tabla 1-13. Parámetros geomorfológicos

Parámetro	Río Lindo	Q. La Pilama	Q. San Juan
Área cuenca [km ²]	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 m ³ /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 elaboración propia

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

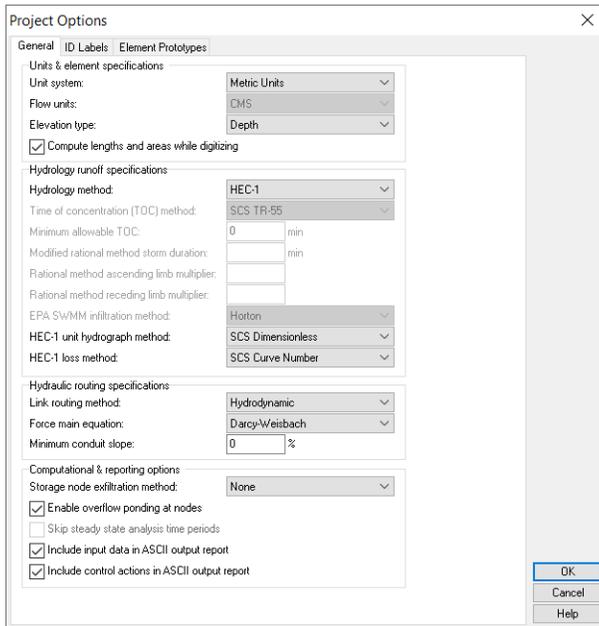


Figura 1-16 Parámetros del modelo hidrológico

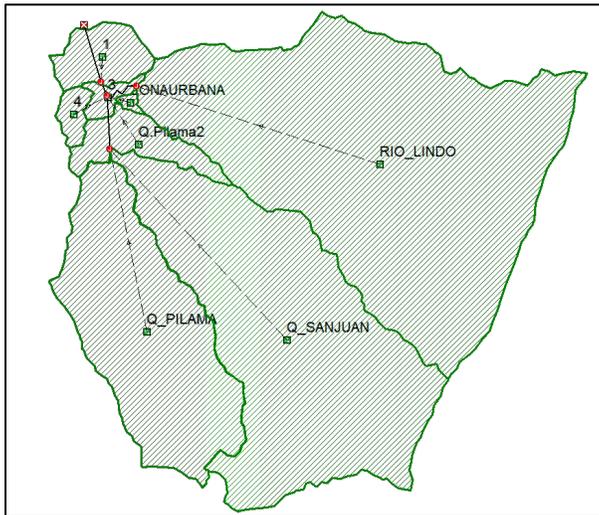


Figura 1-17 Modelo Escorrentía por el número de Curva del SCS.

Subbasins

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

Description: CuencaRio Lindo, Vista

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: ...

Description: CuencaRio Lindo, Vista

Physical Properties Loss & UH Parameters

SCS curve number loss method
Curve number: 75.79
Initial abstraction (mm): 16.23
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	4365.7298	PRECIPITACION

Close Help

Figura 1-18 Datos de entrada para las cuencas.

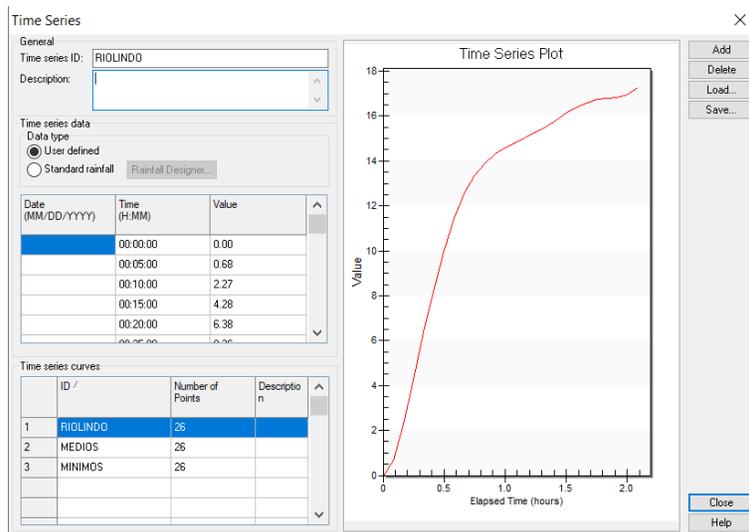


Figura 1-19 Datos de entrada para modelo de lluvia

1.7 Resultados modelo hidrológico caudales actuales

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

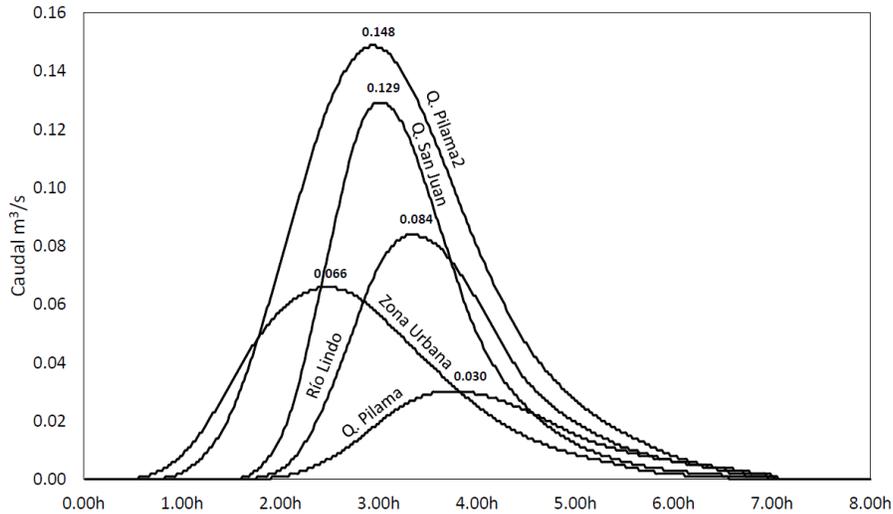


Figura 1-20 Hidrogramas de salida de las cuencas del modelo de escorrentía

1.8 Modelos probabilísticos – para caudales mínimos:

Para realizar el análisis se tienen en cuenta modelos de probabilidad, partiendo de la probabilidad esperada de Hazzen para la serie de datos:

$$p = \frac{2m - 1}{2n}$$

Donde

m = Orden de menor a mayor en la serie de datos

n = Número total de registros

Con los valores correspondientes de probabilidad esperada, se calcula el valor del caudal, para cada una de las siguientes funciones de probabilidad y sus respectivos parámetros.

Tabla 1-14 Funciones de probabilidad para el modelo probabilístico

Función	Parámetros
Normal	\bar{x}, σ
Log Normal	\bar{y}, σ
LogNormal 3	\bar{x}, σ, γ
Gumbel	\bar{x}, σ
LogGumbel	\bar{x}, σ, γ
Pearson	\bar{x}, σ, γ
LogPearson	\bar{x}, σ, γ
Extremos	\bar{x}, σ, γ

Siendo \bar{x}, σ, γ , la media, la desviación estándar y el coeficiente de forma o simetría de los datos, y para realizar la validez estadística del modelo probabilístico, se tiene en cuenta las siguientes pruebas:

Tabla 1-15 Pruebas estadísticas de Validez

Prueba	Parámetro
Error cuadrático medio	Valor mínimo
Kolomogorov	Valor mínimo
Bondad vs Prueba de Chi ²	Valor mínimo
Ajuste por gráfica	Similitud

1.8.1 Análisis de los datos para caudales mínimos

A continuación se presenta la serie de tiempo de los caudales analizados de mínimos del Río Lindo, tomando el promedio para siete días y el mínimo del grupo mensual, luego se toma el mínimo anual entre ellos. Con la serie de esos mínimos, se entra a realizar un análisis de ajuste por distribución para mínimos, para determinar el valor con un periodo de retorno de 10 años, valor que será de referencia como un caudal mínimo.

Tabla 1-16 Serie de datos de caudales mínimos 7Q10 -Río Lindo y Q. Pilama

Año Río Lindo	Mínimo anual Río Lindo	Posición Río Lindo	Año Q. Pilama	Mínimo anual Q. Pilama	Posición Q. Pilama
1991	0.0150	9	1991	0.030	21
1992	0.0100	4	1992	0.011	15
1993	0.0101	6	1993	0.020	19
1994	0.0101	5	1994	0.021	20
1995	0.0147	8	1995	0.004	11
1996	0.0372	12	1996	0.006	12
1997	0.0100	3	1997	0.001	3
1998	0.0158	10	1998	0.002	6
1999	0.0426	14	1999	0.017	17
2000	0.0141	7	2000	0.092	25
2001	0.0010	1	2001	0.097	26
2002	0.0011	2	2002	0.101	27
2003	0.3337	28	2003	0.042	23
2004	0.4882	29	2004	0.006	13
2006	0.1095	21	2005	0.143	30
2007	0.0891	18	2006	0.014	16
2008	0.2347	26	2007	0.003	7
2009	0.0490	15	2008	0.116	28
2010	0.2753	27	2009	0.003	8
2011	0.1880	24	2010	0.010	14
2012	0.0744	17	2011	0.033	22
2013	0.1620	23	2012	0.003	9
2015	0.0390	13	2013	0.003	10
2016	0.1325	22	2014	0.000	1
2017	0.1051	20	2015	0.002	4
2018	0.1050	19	2016	0.002	5
2019	0.0260	11	2017	0.000	2
2020	0.0605	16	2018	0.017	18
2021	0.2055	25	2019	0.085	24
			2020	0.132	29
			2021	0.283	31

De acuerdo con la tabla anterior, se tendrían los siguientes parámetros estadísticos:

Tabla 1-17 Valores de parámetros de las series de tiempo años 1991a 2021

Modelo	\bar{x}	σ	γ
Río Lindo	0.099	0.117	1.799
Q. Pilama	0.042	0.063	2.296

Siendo:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{N - 1}$$

$$\gamma = \frac{N}{(N - 1)(N - 2)} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}}{\sigma^3}$$

1.8.2 Resultados de los modelos probabilísticos

A continuación se presentan los resultados del Río Lindo para cada una de las funciones de probabilidad que se utilizaron.

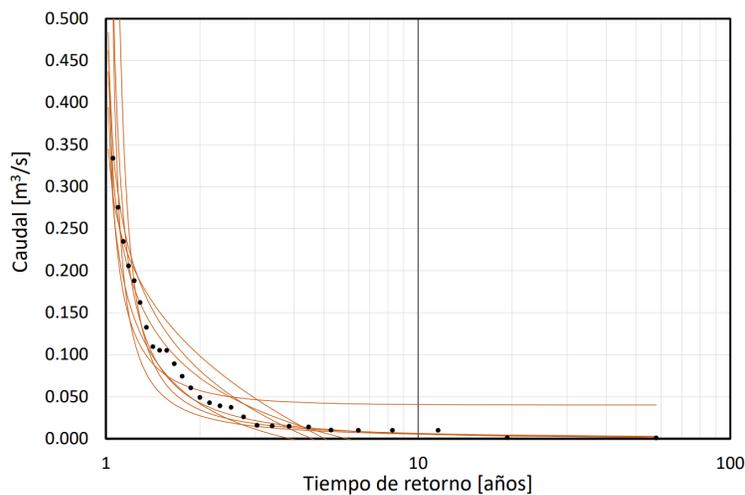


Figura 1-21 Modelos probabilísticos para caudales mínimos Río Lindo.

El resultado de las pruebas de validación estadística, son las siguientes:

Tabla 1-18 Resultado de las pruebas de validez para modelo de mínimos Río Lindo

Función	ECM	Bondad	Chi X ²	Kolmogorov	Criterio
Normal	0.04	79.60	16.92	0.16	Rechazada
Log normal	0.05	15.61	16.92	0.08	Aceptada
Log normal 3	0.04	583153	15.51	0.93	Rechazada
Gumbel	0.04	49.86	16.92	0.16	Rechazada
Log Gumbel	0.22	17	16.92	0.12	Aceptada
Pearson 3	0.04	34.61	15.51	0.22	Rechazada
Log Pearson	0.06	20.38	16.92	0.18	Rechazada
Extremos	0.03	18.03	15.51	0.09	Rechazada

De lo anterior se toman las funciones LogNormal y LogGumbel que mejor se ajustan por los parámetros

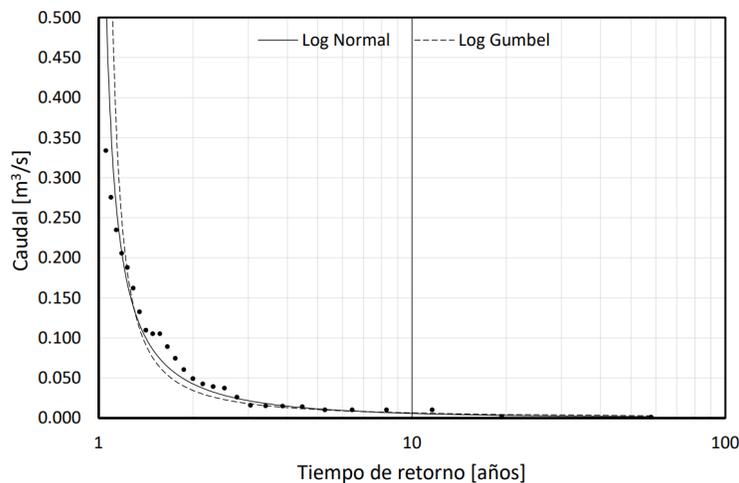


Figura 1-22 Modelos escogidos para caudales mínimos Río Lindo

La función de Log Normal es la que mejor estadísticos presenta, por lo tanto será la función para determinar los caudales mínimos para utilizar en el modelo.

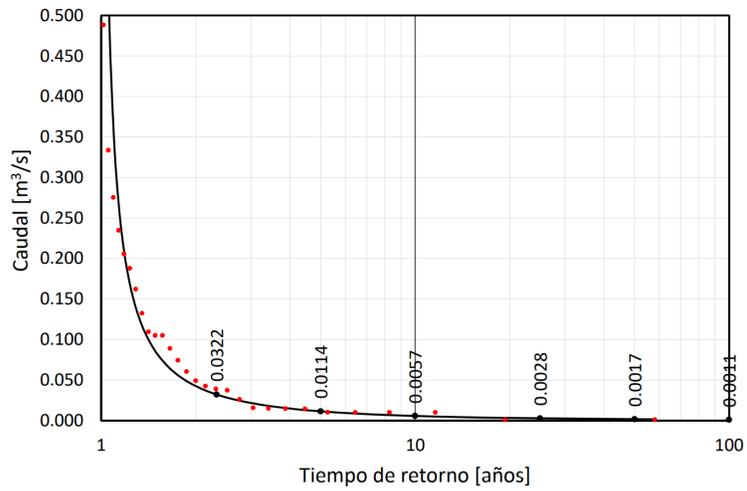


Figura 1-23 Modelo probabilístico para caudales mínimos Río Lindo

Tabla 1-19 Caudales mínimos esperados – Río Lindo

Tr [años]	Caudales [m³/s]
2.33	0.0322
5	0.0114
10	0.0057
25	0.0028
50	0.0017
100	0.0011

A continuación se presentan los resultados de la Quebrada Pilama para cada una de las funciones de probabilidad que se utilizaron.

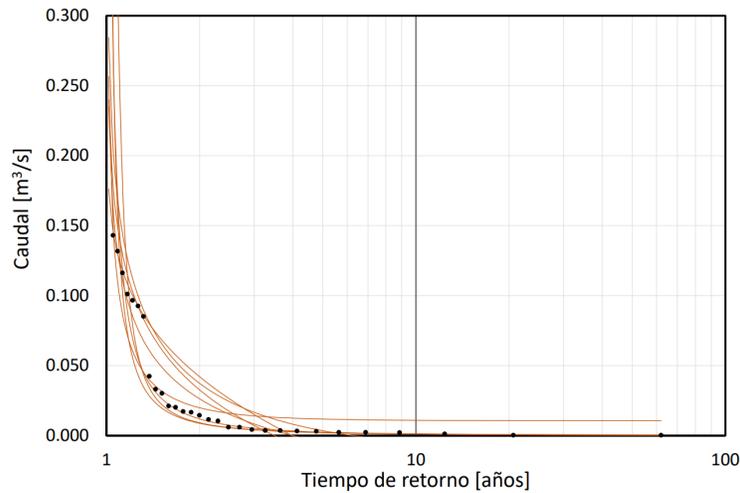


Figura 1-24 Modelos probabilísticos para caudales mínimos Q. Pilama.

El resultado de las pruebas de validación estadística, son las siguientes:

Tabla 1-20 Resultado de las pruebas de validez para modelo de mínimos. Q. Pilama

Función	ECM	Bondad	Chi X²	Kolmogorov	Criterio
Normal	0.02	81.34	16.92	0.23	Rechazada
Log normal	0.03	721.73	16.92	0.12	Aceptada
Log normal 3	0.02	1791085	15.51	0.97	Rechazada
Gumbel	0.02	26.24	16.92	0.25	Rechazada
Log Gumbel	0.19	23427	16.92	0.12	Aceptada
Pearson 3	0.02	35.45	15.51	0.23	Rechazada
Log Pearson	0.04	2199.97	16.92	0.14	Rechazada
Extremos	0.02	157.59	15.51	0.11	Aceptada

De lo anterior se toman las funciones LogNormal y LogGumbel y Extremos que mejor se ajustan por los parámetros

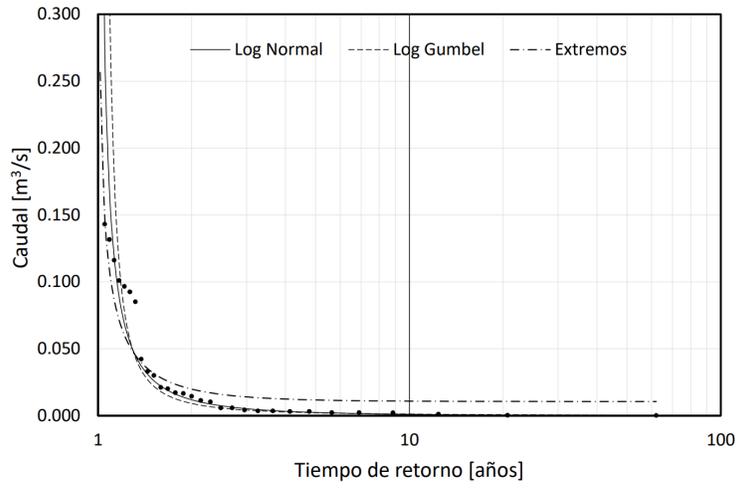


Figura 1-25 Modelos escogidos para caudales mínimos

La función de Log Normal es la que mejor estadísticos presenta, por lo tanto será la función para determinar los caudales mínimos para utilizar en el modelo.

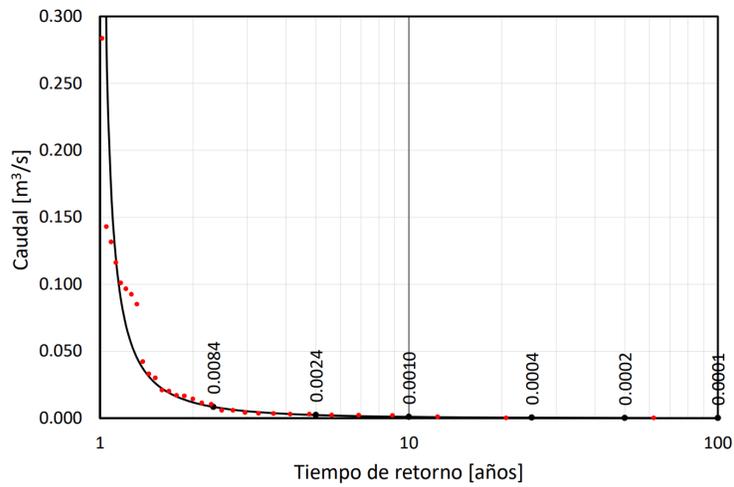


Figura 1-26 Modelo probabilístico para caudales mínimos Q. Pilama

Tabla 1-21 Caudales mínimos esperados – Q. Pilama

Tr [años]	Caudales [m ³ /s]
2.33	0.0084
5	0.0024
10	0.0010
25	0.0004
50	0.0002
100	0.0001

De acuerdo con la configuración tenemos los siguientes nodos de control de caudales, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

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

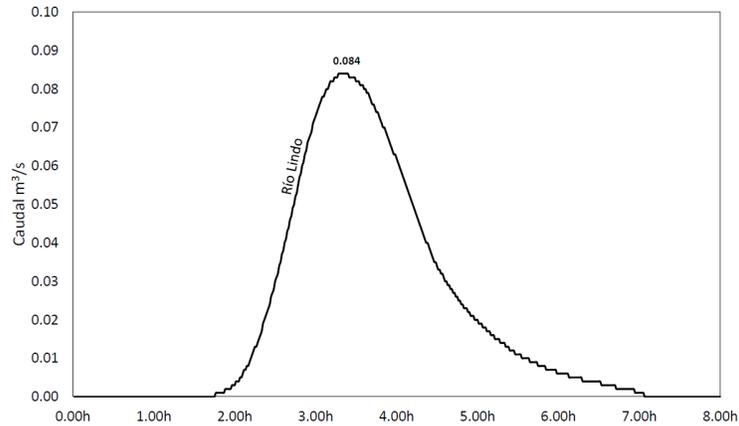


Figura 1-27 Hidrograma Nodo 1

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)

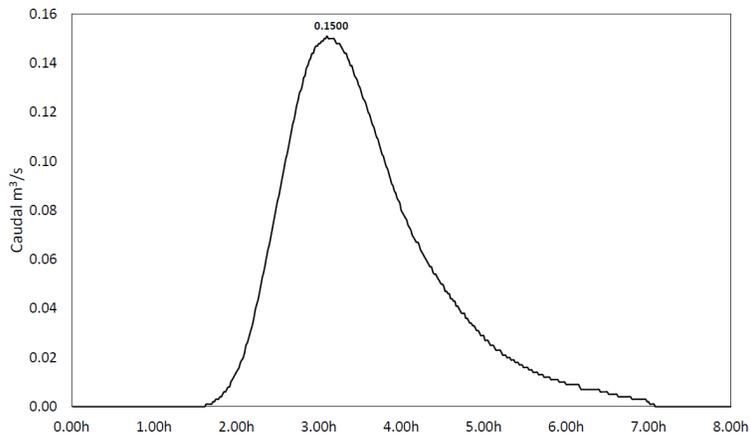


Figura 1-28. Hidrograma Nodo 2

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

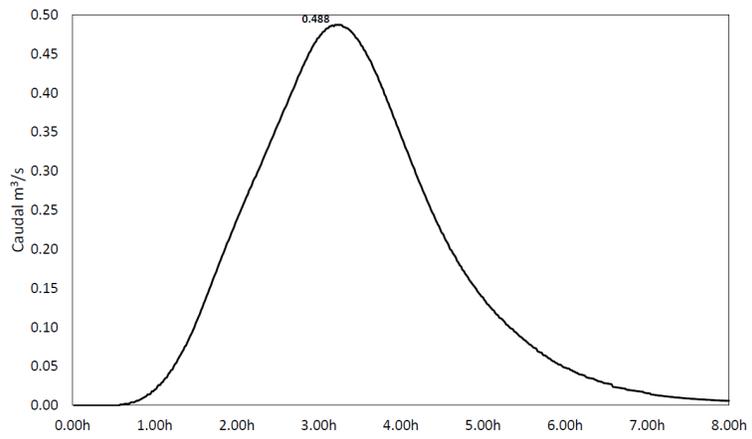


Figura 1-29 Hidrograma Nodo 3

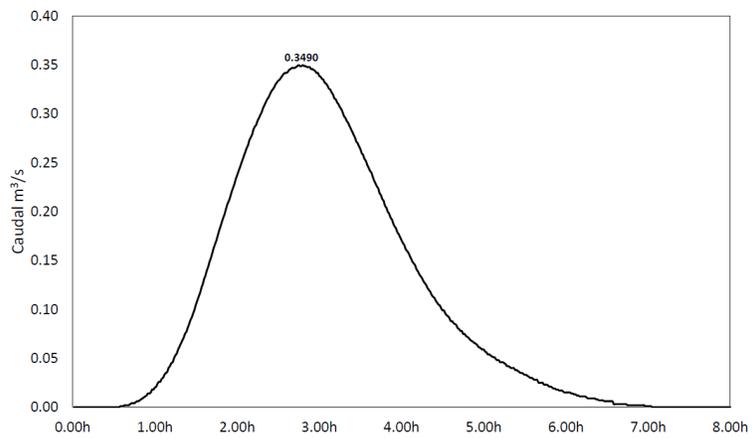


Figura 1-30 Hidrograma N3-N2-N1

2 Proyecciones de población

2.1 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 2-1.

Tabla 2-1 –Distribución espacial Municipio de Viotá - Censo DANE 2018.³

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

Fuente DANE 2018

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 2-2 - Censos de población Viotá, incluye Censo DANE 2018.

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

³ https://sitios.dane.gov.co/cnpv/#!/donde_estamos

Fuente DANE

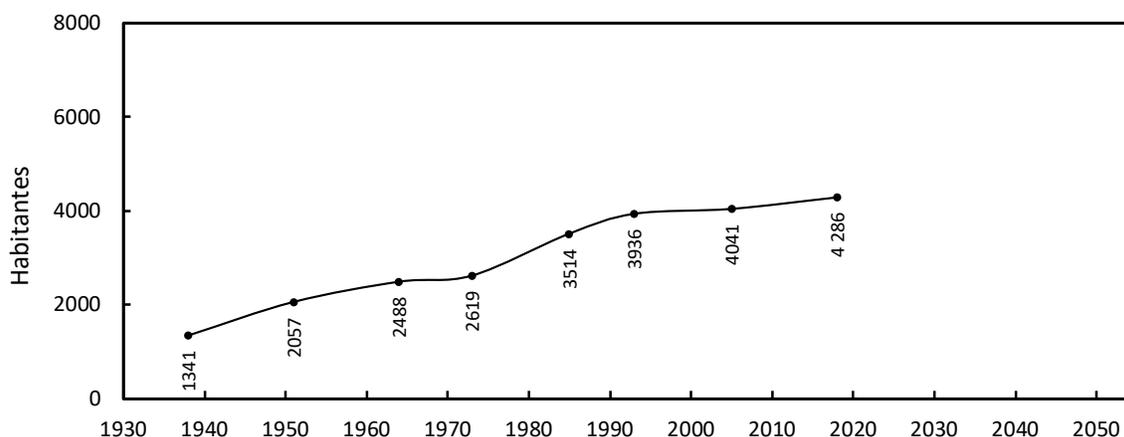


Figura 2-1- Censos de población Viotá – Cund., Cabecera Municipal - DANE 2018.

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.

2.1.1 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 2-3 – 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. A continuación se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045

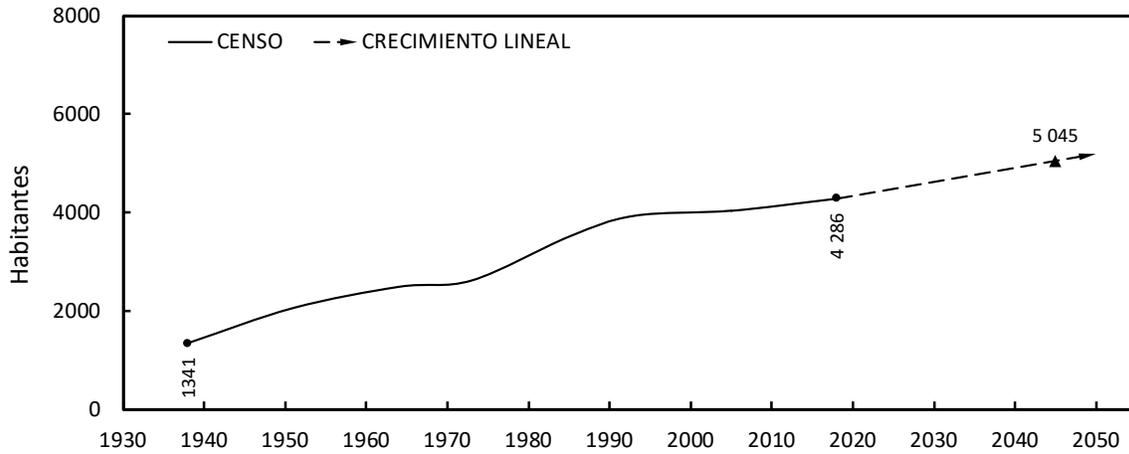


Figura 2-2 – Proyección de población por crecimiento lineal – Cabecera Municipio de Viotá.

2.1.2 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 2-4 – 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 siguiente gráfica, se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045.

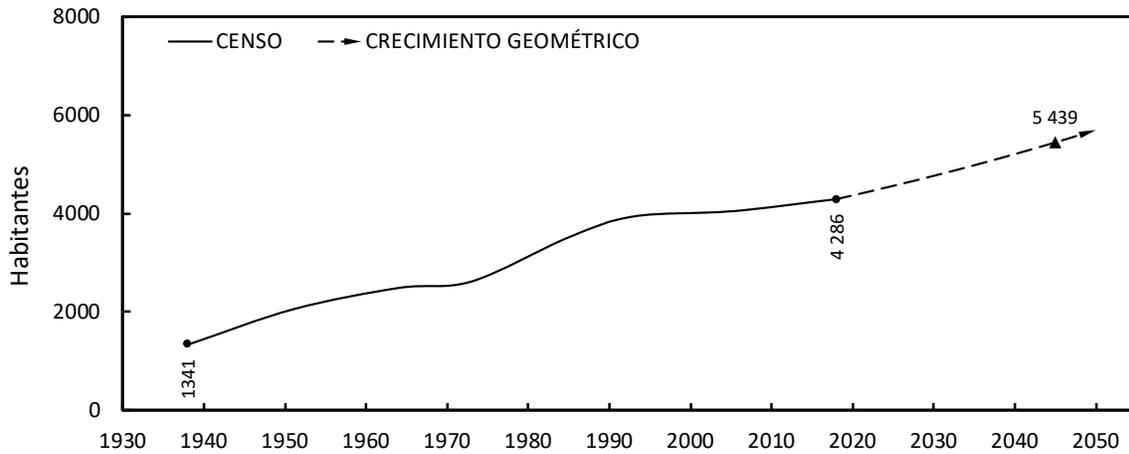


Figura 2-3 – Proyección de población por crecimiento geométrico – Cabecera Municipio de Viotá

2.1.3 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 2-5 – Tasas de crecimiento logarítmico anual. Cabecera Municipio de Viotá

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

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 siguiente gráfica, se presentan los valores para la serie de proyección 2019-2044.

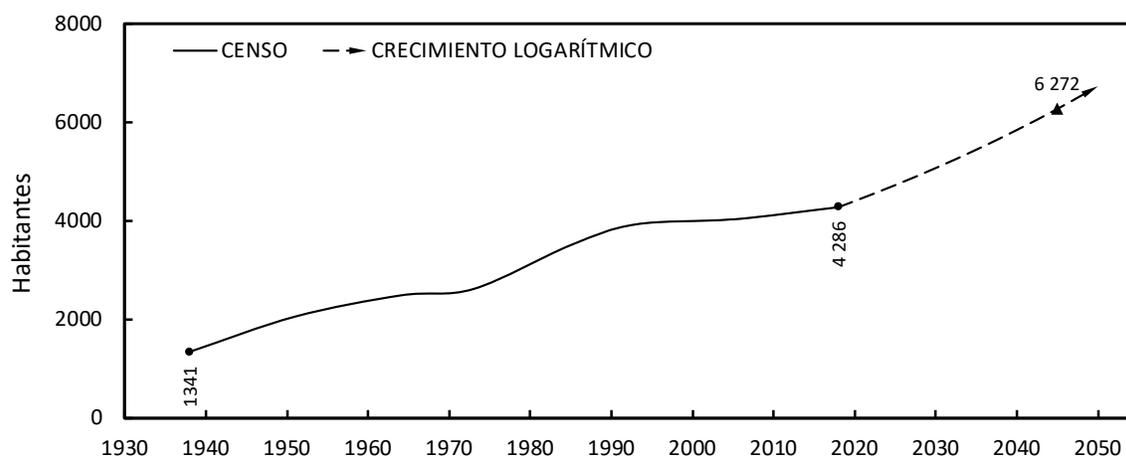


Figura 2-4 - Proyección de población por crecimiento logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá

2.1.4 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 2-6 – 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 .

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

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 siguiente gráfica, se presentan los valores para la serie de proyección 2020-2045 promediada de proyecciones.

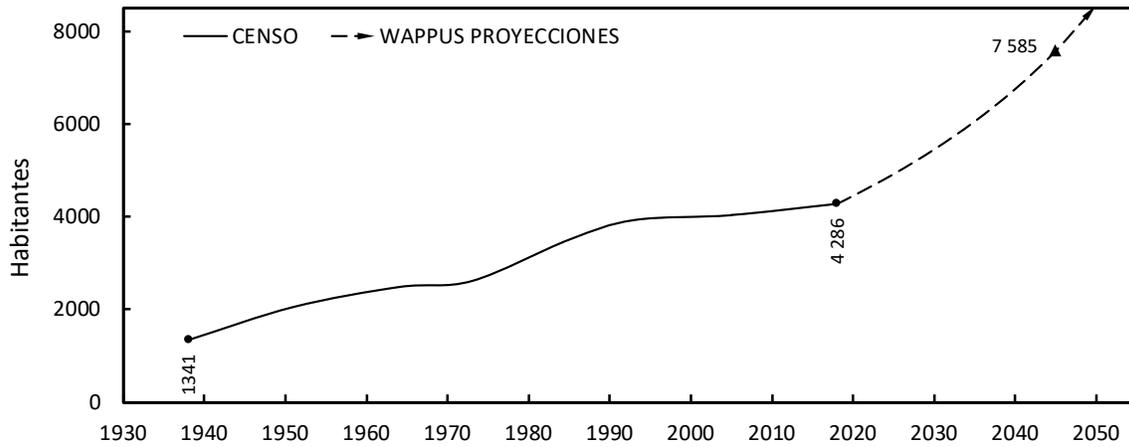


Figura 2-5 - Proyección de población por crecimiento Wappus –Cabecera Municipio de Viotá

2.1.5 Método Wappus Caso 2 (promedio tasas)

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

Tabla 2-7 – 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_i promedio se aplica en la ecuación 8 obteniéndose el siguiente resultado:

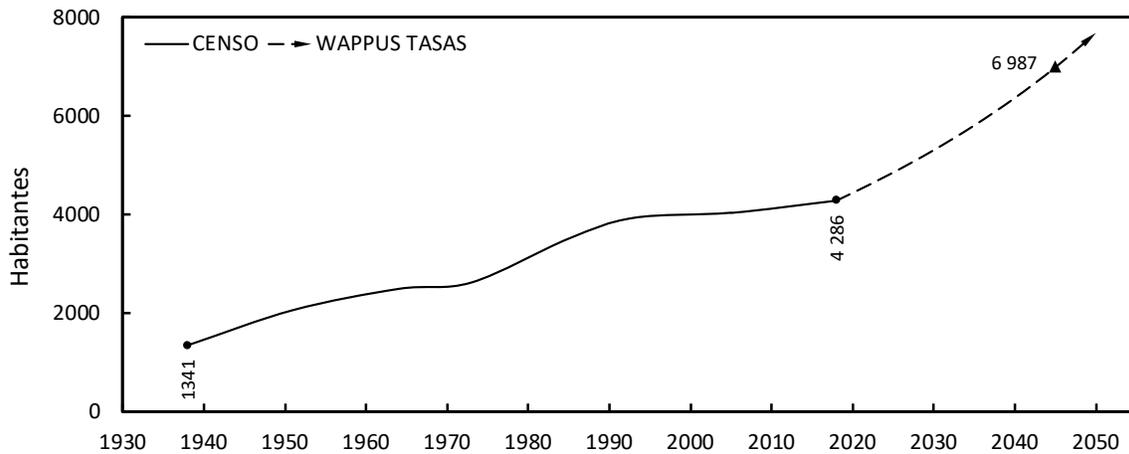


Figura 2-6 - Proyección de población por crecimiento Wappus (Promedio Tasas) – Cabecera Municipio de Viotá

2.1.6 Proyecciones por método 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

$$y = C_2 e^{C_1 X} \quad (\text{Ec. 11})$$

Potencial

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

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

Tabla 2-8 – Coeficientes de ajuste por Mínimos Cuadrados.

	R	R ²	c ₁	c ₂
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 siguiente gráfica, se presentan los valores para las series de proyección 2020-2045 con los anteriores métodos.

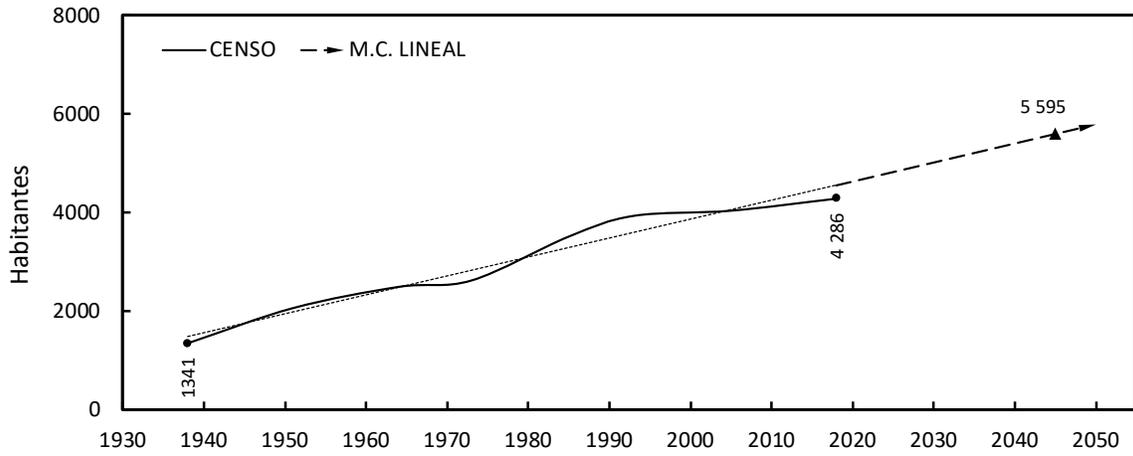


Figura 2-7 - Proyección de población por M.C. caso lineal – Cabecera Municipio de Viotá

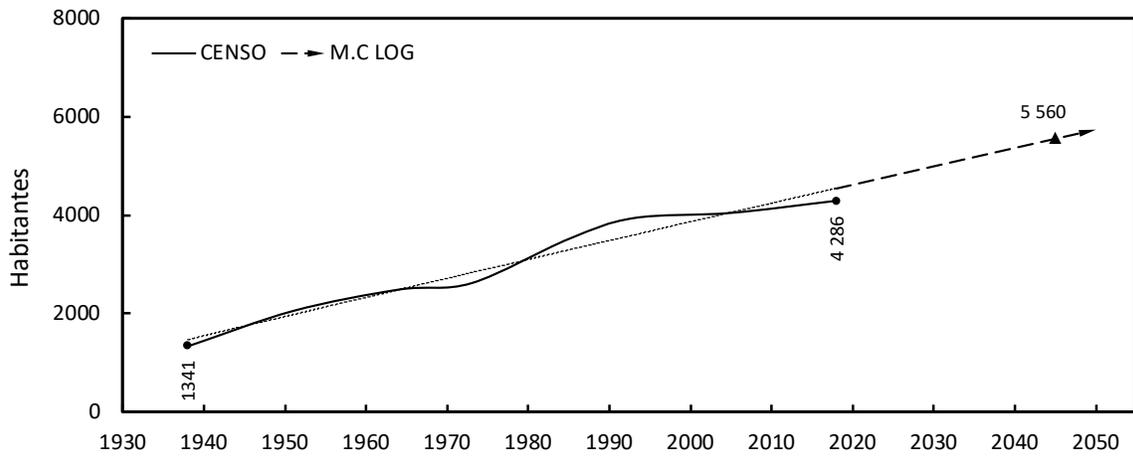


Figura 2-8 - Proyección de población por M.C. caso logarítmico – Cabecera Municipio de Viotá

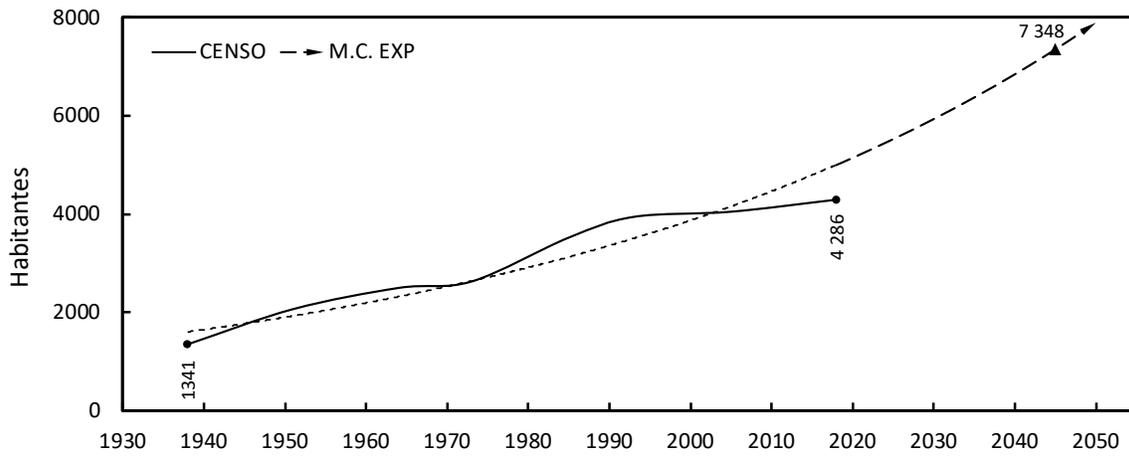


Figura 2-9 - Proyección de población por M.C. caso Exponencial – Cabecera Municipio de Viotá

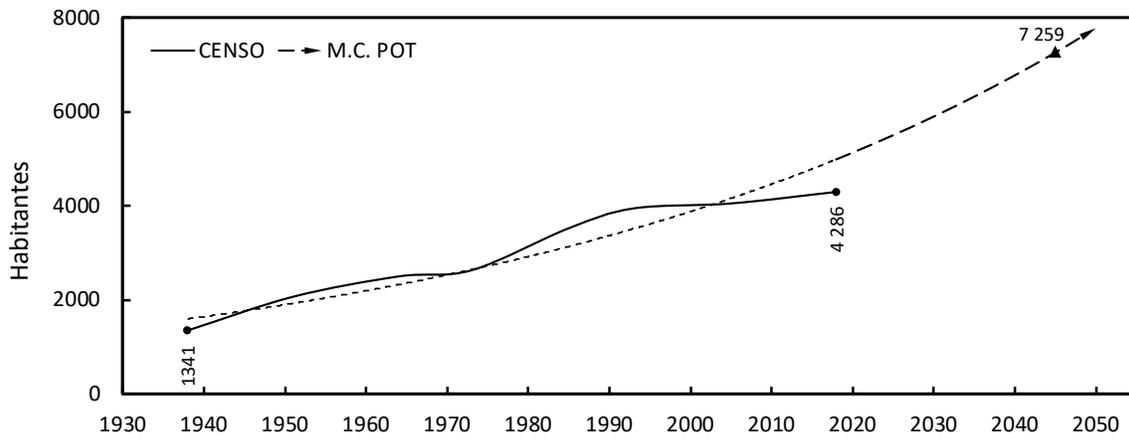


Figura 2-10 - Proyección de población por M.C. caso Potencial – Cabecera Municipio de Viotá

2.1.7 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 2-9, se presentan los valores para todas las series de proyección.

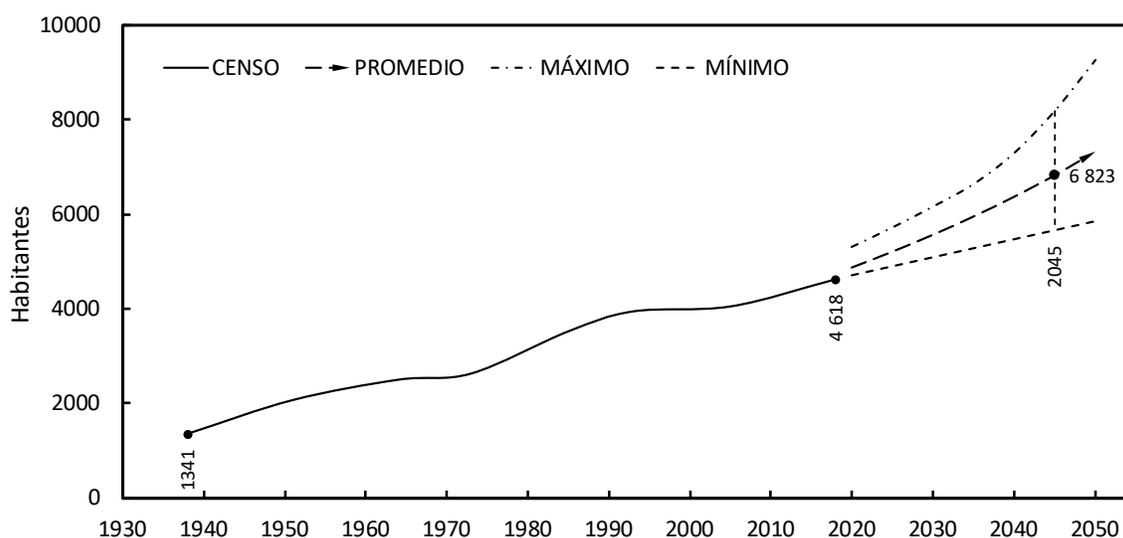


Figura 2-11 – Resumen de métodos de proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá

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:

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

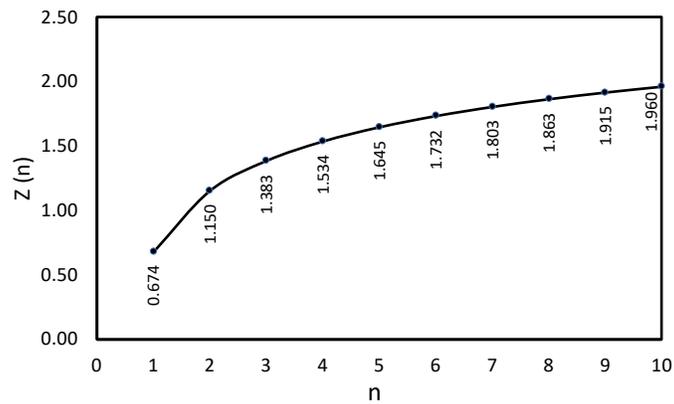


Figura 2-12 – Estadístico de Chauvenet para valores de n datos

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 siguiente tabla.

Tabla 2-9 Resumen de métodos de proyección de población. Cabecera Municipio de Viotá

	C.LINEAL	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	4 618	4 618	4 618	4 618	4 618	4 618	4 618	4 618	4 618				4 286	
2019	4 656	4 669	4 687	4 711	4 701	4 742	4 731	5 243	5 227	238	9	5 274	4 819	4 364
2020	4 695	4 720	4 758	4 806	4 786	4 783	4 771	5 322	5 303	246	9	5 354	4 883	4 412
2021	4 733	4 772	4 829	4 904	4 872	4 824	4 811	5 401	5 381	256	9	5 438	4 947	4 456
2022	4 771	4 825	4 902	5 003	4 960	4 865	4 852	5 482	5 460	268	9	5 527	5 013	4 499
2023	4 809	4 878	4 975	5 105	5 050	4 906	4 892	5 563	5 539	282	9	5 620	5 080	4 540
2024	4 848	4 932	5 050	5 209	5 141	4 947	4 932	5 646	5 620	298	9	5 717	5 147	4 577
2025	4 886	4 986	5 126	5 316	5 234	4 987	4 972	5 731	5 702	315	9	5 819	5 216	4 613
2026	4 925	5 041	5 203	5 425	5 329	5 028	5 012	5 816	5 785	334	9	5 924	5 285	4 646
2027	4 963	5 097	5 281	5 537	5 425	5 069	5 052	5 903	5 870	354	9	6 033	5 355	4 677
2028	5 001	5 153	5 360	5 652	5 524	5 110	5 092	5 991	5 955	376	9	6 146	5 426	4 706
2029	5 039	5 210	5 440	5 769	5 624	5 151	5 132	6 080	6 042	399	9	6 264	5 499	4 734
2030	5 078	5 268	5 522	5 890	5 727	5 192	5 172	6 171	6 130	424	9	6 384	5 572	4 760
2031	5 116	5 327	5 605	6 014	5 831	5 233	5 212	6 263	6 219	450	9	6 509	5 647	4 785
2032	5 154	5 386	5 689	6 141	5 938	5 274	5 252	6 357	6 310	478	9	6 637	5 722	4 807
2033	5 193	5 446	5 775	6 272	6 047	5 315	5 291	6 452	6 401	507	9	6 770	5 799	4 828
2034	5 231	5 506	5 861	6 406	6 158	5 356	5 331	6 548	6 494	538	9	6 907	5 877	4 847
2035	5 269	5 567	5 949	6 545	6 271	5 397	5 371	6 646	6 588	570	9	7 047	5 956	4 865
2036	5 308	5 629	6 039	6 687	6 387	5 438	5 411	6 745	6 684	603	9	7 191	6 036	4 881
2037	5 346	5 692	6 129	6 834	6 505	5 479	5 451	6 845	6 781	639	9	7 340	6 118	4 896
2038	5 384	5 755	6 221	6 985	6 626	5 520	5 491	6 947	6 879	675	9	7 494	6 201	4 908
2039	5 423	5 819	6 315	7 140	6 750	5 561	5 530	7 051	6 979	713	9	7 651	6 285	4 919
2040	5 461	5 884	6 409	7 301	6 876	5 602	5 570	7 156	7 080	753	9	7 813	6 371	4 929
2041	5 499	5 950	6 506	7 467	7 005	5 643	5 610	7 263	7 183	795	9	7 980	6 458	4 936
2042	5 537	6 016	6 603	7 638	7 137	5 684	5 649	7 371	7 287	838	9	8 152	6 547	4 942
2043	5 576	6 084	6 702	7 816	7 273	5 725	5 689	7 481	7 392	883	9	8 329	6 638	4 947
2044	5 614	6 152	6 803	7 999	7 411	5 766	5 729	7 593	7 499	930	9	8 511	6 730	4 949
2045	5 652	6 221	6 905	8 189	7 552	5 807	5 768	7 706	7 607	980	9	8 698	6 823	4 948
2050	5 844	6 577	7 439	9 258	8 313	6 012	5 966	8 299	8 172	1 261	9	9 733	7 320	4 907

2.1.8 Proyecciones de población Municipio de Viotá

Tabla 2-10 - Proyección de población – Cabecera Municipio de Viotá. Años 2018 – 2044

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

Fuente: Elaboración propia

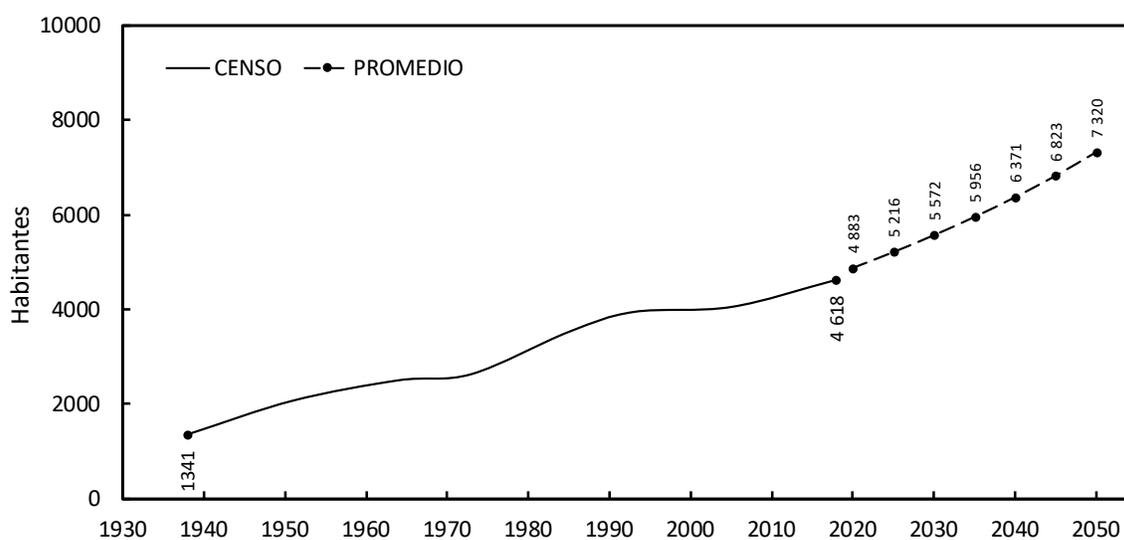


Figura 2-13 - Curva de proyección población Cabecera Viotá

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.