

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA DESCARGA DE LIXIVIADO DEL
RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN EL RIO TUNJUELO.**

ANA MARIA MADRIGAL SANCHEZ

GIOVANNY ANDRES LIZCANO CASTRO



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA DESCARGA DE LIXIVIADO DEL
RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN EL RIO TUNJUELO.**

**ANA MARIA MADRIGAL SANCHEZ
GIOVANNY ANDRES LIZCANO CASTRO**

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Director:

**Juan Manuel Gutiérrez Segura (IC)
Ingeniero Civil, M.Sc.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**

A nuestras familias, por su amor, confianza y valioso apoyo y por estar siempre creyendo en nosotros.

Ana María – Giovanni Andrés

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Juan Manuel Gutiérrez, por la colaboración, apoyo y dirección en este trabajo de Grado.

Al ingeniero Luis Alberto Jaramillo por sus constantes aportes y puntos de vista que nos ayudaron a darle mayor objetividad al proyecto

A los Ingenieros Alejandro Montes y John Henao, que nos asesoraron y colaboraron en la realización de modelos hidráulicos y de calidad.

Al personal del relleno sanitario que permitió realizar las mediciones y facilitar el acceso a la zona de vertimiento.

A los profesores de la Pontificia Universidad Javeriana que participaron en nuestra formación profesional.

Finalmente a todos nuestros compañeros y aquellas personas que con sus aportes contribuyeron de una u otra forma en el desarrollo de este documento de Grado.

La evolución y el desarrollo de las actividades humanas han traído como consecuencia la generación de volúmenes importantes de residuos sólidos, es por esto que se han diseñado diferentes métodos que permiten la gestión de dichos residuos con el fin de disminuir los impactos ambientales y de salud pública que estos puedan producir si no se controlan. El relleno sanitario es uno de estos métodos, que se utiliza con el fin de realizar una disposición final y segura de los residuos sólidos, sin embargo la utilización de estos lleva a otra consecuencia que es la generación de lixiviados que surgen de la descomposición de los residuos sólidos, lo que los convierte en una sustancia líquida peligrosa que lleva a la contaminación potencial de fuentes hídricas y del suelo.

Los lixiviados como potencial fuente de contaminación deben ser recolectados y tratados en plantas de tratamiento ya que estos al terminar este proceso son vertidos al medio ambiente, en especial a los cursos de agua, por lo que estos pueden afectar de manera importante la calidad de la misma llevando a la destrucción de la vida dentro de éste y a no poder utilizar esta fuente para diferentes usos, es por esto que se debe garantizar que el vertimiento de los lixiviados tenga el mínimo impacto tanto en el punto de vertimiento como aguas abajo en su recorrido.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, surgió la motivación de realizar un trabajo de Grado para la evaluación del comportamiento que tiene la descarga de lixiviados producida por el Relleno Sanitario Doña Juana y que es vertida al Río Tunjuelo, para su logro se realizaron entre otras actividades principales como campañas de medición en campo de parámetros de conductividad, pH, temperatura, sólidos disueltos totales, toma de muestras de agua para determinar parámetros de demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total orgánico y sólidos suspendidos volátiles, y simulaciones a partir del desarrollo de modelos hidráulicos y de calidad para la obtención de resultados.

El desarrollo de las actividades descritas y su análisis permitió determinar el comportamiento de la descarga de la masa contaminante de lixiviado sobre el río Tunjuelo, y el impacto que genera sobre él en términos de parámetros de calidad de agua no conservativos.

Índice general

Índice de Gráficas.....	3
Índice de Ilustraciones.....	5
Índice de tablas.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO.	7
2.1 Mecanismos de Transporte	7
2.2 Parámetros de Campo.....	9
2.3 Parámetros de calidad del agua.....	10
2.4 Modelo de Calidad Qual2k	13
2.5 Modelo de transito hidráulico Hec Ras.....	15
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....	15
3.1 Localización del Relleno Sanitario Doña Juana.....	15
3.1.1 Estructura de entrada y derivación	17
3.1.2 Línea de Agua	18
3.1.2.1 Tratamiento Físico Químico No.1	18
3.1.2.2 Tratamiento Físico Químico No.2	19
3.1.2.3 Tratamiento Biológico.....	20
3.1.2.4 Tratamiento de Lodos.....	21
3.2 Río Tunjuelo.....	23
3.3 Zona de Estudio.....	25
4. MEDICIONES DE CAMPO.	27
4.1 Procedimientos.	27
4.1.1 Aforos	27
4.1.2 Toma de parámetros de campo y muestras.....	30
4.2 Resumen de campañas de medición de parámetros de campos.	32
4.3 Análisis de campañas de medición de parámetros de campo.	35
4.3.1 Primera campaña.....	35
4.3.2 Segunda campaña.....	39
4.3.3 Tercera campaña.....	42
4.3.4 Cuarta Campaña.....	47
4.4 Resumen de campañas de velocidades.	50

5. DETERMINACIÓN DE CAMBIOS EN LAS CONCENTRACIONES DE PARÁMETROS DE CALIDAD.....	53
6. MODELO DE TRÁNSITO HIDRÁULICO EN HEC-RAS PARA LA SECCIÓN DE ESTUDIO DEL RIO TUNJUELO.....	61
6.1 Montaje del modelo.....	61
6.2 Simulación y resultados.....	63
7. MODELO DE CALIDAD DE AGUA EN QUAL2K PARA LA EVALUACIÓN DEL RIO TUNJUELO.....	66
7.1 Montaje del modelo.....	66
7.2 Simulación y resultados.....	68
7.2.1 Escenario 1: Q máx. río= 6.73 m ³ /s.....	68
7.2.2 Escenario 2: Q medio río= 2.76 m ³ /s.....	72
7.2.3 Escenario 3: Q mín. río= 0.31 m ³ /s.....	76
7.2.4 Escenario 4: Q máx. río= 6.73 m ³ /s con vertimiento de lixiviado sin tratar.....	80
7.2.5 Escenario 5: Q medio río= 2.76 m ³ /s con vertimiento de lixiviado sin tratar.	85
7.2.6 Escenario 6: Q mín. río= 0.31 m ³ /s con vertimiento de lixiviado sin tratar.	89
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
<i>Referencias Bibliográficas</i>	97
<i>Anexos</i>	101

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Niveles de Conductividad vs Abscisa del río.	31
Gráfica 2. Conductividad. Primera campaña	36
Gráfica 3. Sólidos Disueltos totales. Primera Campaña.....	37
Gráfica 4. A. Comparación Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$) (Izq.). B. SDT (der.). Primera Campaña.	38
Gráfica 5. pH Primera campaña.....	38
Gráfica 6. Temperatura. Primera Campaña	39
Gráfica 7. Conductividad. Segunda Campaña	40
Gráfica 8. Sólidos disueltos totales. Segunda Campaña	41
Gráfica 9. pH. Segunda Campaña.....	41
Gráfica 10. Temperatura. Segunda Campaña.....	42
Gráfica 11. Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$). Tercera Campaña	43
Gráfica 12. Sólidos disueltos totales. Tercera Campaña.	44
Gráfica 13. pH. Tercera Campaña.....	44
Gráfica 14. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Tercera Campaña	45
Gráfica 15. Conductividad($\mu\text{s}/\text{cm}$) vs tiempo en $x=-10\text{m}$ (izq.) y $x=0\text{ m}$ (der.).....	46
Gráfica 16. Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$) vs tiempo en $x=10\text{m}$ (izq.) y $x=60\text{m}$ (der.).....	46
Gráfica 17. Conductividad vs tiempo en $x=90\text{m}$	46
Gráfica 18. Conductividad. Cuarta Campaña	48
Gráfica 19. Sólidos disueltos totales. Cuarta campaña.....	49
Gráfica 20. Temperatura. Cuarta Campaña	49
Gráfica 21. pH. Cuarta Campaña.....	50
Gráfica 22. Conductividad en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio.	55
Gráfica 23. pH en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio.	56
Gráfica 24. SST en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio	57
Gráfica 25. SSV en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio	57
Gráfica 26. Nitrógeno total orgánico en muestras puntuales	58
Gráfica 27. DQO en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio.....	59
Gráfica 28. DBO ₅ en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio	60
Gráfica 29. Comparación velocidades obtenidas con información secundaria	62
Gráfica 30. Resultados de las velocidades obtenidas en Hec-Ras	64
Gráfica 31. Niveles de la lámina de agua obtenida en Hec-Ras.....	64
Gráfica 32. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 1	69
Gráfica 33. CDBO obtenido de Qual2k. Escenario 1	69
Gráfica 34. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 1.	70
Gráfica 35. pH obtenido de Qual2k. Escenario 1	70
Gráfica 36. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 1	71
Gráfica 37. SST obtenido de Qual2k. Escenario 1	71
Gráfica 38. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 2.....	72
Gráfica 39. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 2	73
Gráfica 40. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 2	74
Gráfica 41. pH obtenido de Qual2k. Escenario 2	75

Gráfica 42. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 2.....	75
Gráfica 43. SST obtenido de Qual2k. Escenario 2.....	76
Gráfica 44. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 3.....	77
Gráfica 45. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 3.....	78
Gráfica 46. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 3.....	78
Gráfica 47. pH obtenido de Qual2k. Escenario 3.....	79
Gráfica 48. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 3.....	79
Gráfica 49. SST obtenido de Qual2k. Escenario 3.....	80
Gráfica 50. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 4.....	81
Gráfica 51. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 4.....	82
Gráfica 52. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 4.....	83
Gráfica 53. pH obtenido de Qual2k. Escenario 4.....	83
Gráfica 54. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 4.....	84
Gráfica 55. SST obtenido de Qual2k. Escenario 4.....	84
Gráfica 56. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 5.....	85
Gráfica 57. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 5.....	86
Gráfica 58. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 5.....	87
Gráfica 59. pH obtenido de Qual2k. Escenario 5.....	87
Gráfica 60. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 5.....	88
Gráfica 61. SST obtenido de Qual2k. Escenario 5.....	88
Gráfica 62. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 6.....	89
Gráfica 63. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 6.....	90
Gráfica 64. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 6.....	91
Gráfica 65. pH obtenido de Qual2k. Escenario 6.....	91
Gráfica 66. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 6.....	92
Gráfica 67. SST obtenido de Qual2k. Escenario 6.....	92

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 . Ciclo del carbono. Fuente: <i>Kormondy (1969)</i>	11
Ilustración 2. Ciclo del nitrógeno. Fuente: <i>Kormondy (1969)</i>	12
Ilustración 3. Localización del Relleno Sanitario Doña Juana. <i>Tomado de: Google Earth</i> 16	
Ilustración 4. Planta de Tratamiento de Lixiviados PTL del Relleno Sanitario Doña Juana.	16
Ilustración 5. Canal de transporte de lixiviado de la Planta de Tratamiento de Lixiviado (PTL) al río Tunjuelo.....	22
Ilustración 6. Descarga puntual del lixiviado en el río Tunjuelo	22
Ilustración 7. Movimiento de la masa contaminante a lo largo de la zona de estudio.....	23
Ilustración 8. Curso del Río Tunjuelo. Sentido del Flujo derecha a izquierda.	23
Ilustración 9. Ubicación de la zona de estudio. En azul, conducción del lixiviado.....	25
Ilustración 10. Conducción y vertimiento del lixiviado (azul), Zona de muestreo (naranja) 26	
Ilustración 11. Presencia de canteras y asentamientos urbanos aguas arriba del vertimiento.	27
Ilustración 12. Flotadores en el río.....	29
Ilustración 13. Secciones obtenidas con información secundaria.....	30
Ilustración 14. Equipos para toma de parámetros de campo. Conductivímetro (Izq.) pHmetro (der.)	30
Ilustración 15. Esquema #1 de abscisas en el río	33
Ilustración 16. Esquema #2 de abscisas en el río	33
Ilustración 17 Esquema #3 de abscisas en el río	34
Ilustración 18. Esquema de abscisas de muestreo puntual en el Río	34
Ilustración 19. Distribución de velocidades en sección transversal para segunda campaña (8 de abril).....	52
Ilustración 20. Localización muestreo puntual.....	54
Ilustración 21. Sección transversal de la abscisa 0 del río.....	62
Ilustración 22. Datos iniciales de alimentación del modelo de calidad de agua	66
Ilustración 23. Condiciones iniciales para simulación de escenarios.....	68
Ilustración 24. Condiciones iniciales para simulación de escenarios.....	72
Ilustración 25. Condiciones iniciales para simulación de escenarios.....	76
Ilustración 26. Condiciones para simulación escenario 4.	81
Ilustración 27. Condiciones para simulación escenario 5.	85
Ilustración 28. Condiciones para simulación escenario 6.	89

Índice de tablas

Tabla 1. Ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Javeriana.....	32
Tabla 2. Sub campañas. Primera Campaña.....	36
Tabla 3. Sub campañas. Segunda Campaña.....	40
Tabla 4. Sub campañas. Tercera Campaña.....	43
Tabla 5. Sub campañas. Cuarta Campaña.....	47
Tabla 6. Velocidades promedio del Río.....	52
Tabla 7. Valores para cálculo de Longitud de mezcla en temporada seca.....	53
Tabla 8. Valores para cálculo de Longitud de mezcla en temporada de lluvia.....	53
Tabla 9. Caudales medios multianuales históricos.....	63
Tabla 10. Comparación de resultados obtenidos en Hec-Ras y en campo.....	65
Tabla 11. Resultados de Parámetros Calculados por Hec-Ras.....	65
Tabla 12. Puntos distribuidos a lo largo del tramo de estudio.....	67
Tabla 13. Parámetros de Calidad del Lixiviado.....	80

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento es realizado como trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniero Civil y tiene como objetivo principal la “**Evaluación del comportamiento de la descarga de lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana en el Río Tunjuelo**”.

Los objetivos específicos son:

- “Determinar los cambios en concentración de los contaminantes (Demanda Biológica de Oxígeno “DBO”, Demanda Química de Oxígeno “DQO”, Sólidos Suspendidos Totales “SST”, Sólidos Suspendidos Volátiles “SSV” y Nitrógeno total orgánico) y los parámetros de campo (conductividad, pH y temperatura), provenientes del lixiviado que sufre el cuerpo receptor, respecto al mismo en condición aguas arriba de dicha descarga”, por medio de la realización de campañas de medición in situ y en laboratorio.
- “Modelar el comportamiento en el modelo QUAL2K (Aggregated Dead Zone) y evaluar la calidad de agua del río Tunjuelo frente a la carga contaminante asociada al lixiviado vertido.”, por medio de la alimentación del modelo con datos obtenidos del laboratorio.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Mecanismos de Transporte

El comportamiento para el transporte de una sustancia depende principalmente de 2 factores, su velocidad en el medio y su reactividad, ésta última está relacionada con el conjunto de procesos físico-químicos y biológicos que degradan dicha sustancia (*Monerris y Doménech, 2001*).

Si una sustancia no cambia por medio de estos procesos reactivos se considera como una *sustancia conservativa*, y su evolución es debido a el movimiento de la masa como un global. En el caso contrario donde la sustancia cambie, se denominan como *sustancias no conservativas* (*Monerris y Doménech, 2001*).

En este estudio se evaluarán parámetros *No conservativos*, para los cuales pueden presentarse procesos de:

Difusión: “Se refiere al movimiento de la masa debido al movimiento aleatorio o mezclado. Este transporte causa el esparcimiento de la mancha, diluyéndola en el tiempo con un movimiento neto despreciable del centro de masa.”(*Chapra, 2008*).

Convección: es producto del movimiento del contaminante con el cuerpo receptor. Los fenómenos que producen dicho transporte son principalmente

diferencias de nivel, viento, mareas, rozamiento con el fondo y gradientes de densidad.

En algunos casos es denominado *Advección* (Monerris y Doménech, 2001), en este proceso se mueve la materia de una posición en el espacio a otra sin cambiar la identidad de la sustancia que está siendo transportada (Chapra, 2008).

Dispersión: Se refiere a los procesos que no están relacionados con el movimiento del flujo. La pluma que marca el contaminante es extendida, no sólo en la dirección del flujo sino en direcciones transversales, produciendo que ésta misma incremente su ancho.

Hay 3 procesos, principalmente, que generan este tipo de transporte: Difusión molecular, turbulenta y dispersión. El primero es el desplazamiento aleatorio de partículas, llega a ser tan lento que no suele ser práctico en los estudios. El segundo proceso refiere a turbulencias a micro escala debido a variaciones instantáneas de la velocidad. El último proceso resulta de la interacción de la turbulencia con un perfil de velocidades definido en el sistema, lo que conlleva a una mayor mezcla (Monerris y Doménech, 2001).

La **longitud de mezcla** propuesta por Fischer (1979) en dispersión lateral, caso a tratar, depende del coeficiente de dispersión lateral, E_{lat} , dado por:

$$E_{lat} = 0.6 * H * u \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

H: profundidad del río en m,

u: velocidad friccional en m/s calculada con

$$u = \sqrt{g * H * s} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

g: aceleración gravitacional en m/s²

s: pendiente del río en m/m

La longitud de mezcla resulta por medio de la aplicación de la siguiente ecuación que recoge los factores calculados anteriormente.

$$L_{mezcla} = 0.4 * u * \frac{B^2}{E_{lat}} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

L mezcla: longitud de mezcla en m,

u: velocidad friccional en m/s encontrado en la ecuación 2

B: ancho del río en m, y

E lat: coeficiente de dispersión lateral hallado en la ecuación 1

Como menciona (*Moneris y Doménech, 2001*). “Estas expresiones pueden ser muy útiles cuando se desee saber a qué distancia de un punto de vertido se producirá la mezcla completa del vertido con el río. Cuando se realiza el muestreo de agua de un cauce aguas abajo del vertido, es fundamental elegir puntos representativos”, siguiendo esta premisa, se presenta la selección de puntos tomados en el Río Tunjuelo en el inciso 4.3.3.

2.2 Parámetros de Campo.

En los modelos de equilibrio, se parte de una descripción del tramo en estudio, con el fin de predecirlo en diferentes condiciones. Es por esto que se hace de gran importancia contar con mediciones de parámetros en campo que permitan cumplir con este objetivo de descripción.

Dentro de los parámetros de campo seleccionados para medir en el tramo de estudio del río Tunjuelo se encuentran el pH y la temperatura, debido a que dichos valores son fundamentales para alimentar el modelo de calidad. Adicionalmente se encuentra la conductividad que se midió en terreno como parámetro indicativo de la presencia y cantidad de sólidos que presenta el cuerpo receptor y finalmente la cantidad de sólidos disueltos totales debido a la relación de afinidad que tienen con la conductividad (*Massol, 2002*), con esto se generó un panorama general del avance de la masa contaminante dentro del río.

A continuación se describen los parámetros mencionados anteriormente.

PH: El PH o potencial de hidrógeno es una medida que define la concentración de iones de hidrógeno presentes en el agua, con esto se determina la naturaleza de ésta y se clasifica en básica o alcalina (valores de PH mayores a 7), o ácida (valores de PH menores a 7). Este parámetro es de gran importancia, debido a que de éste depende que muchos procesos químicos y biológicos del agua se puedan realizar (*Chapra, 2008*), además de que los modelos de equilibrio “describen la adsorción de especies iónicas sobre adsorbentes con cargas superficiales variables. Que son procesos fuertemente dependientes del pH” (*Moneris y Doménech, 2001*).

Temperatura: La temperatura es un parámetro de campo que permite determinar el nivel de actividad de las poblaciones microbianas, éste es de gran importancia ya que por este factor pueden verse alterados diferentes procesos

químicos y físicos del agua, y además puede verse alterada la vida de los organismos presentes en el medio (Arce Velázquez, 2013).

Sólidos Disueltos Totales (SDT): esta medida indica los residuos sólidos filtrables en una membrana de poros de mínimo 2.0 μm , en agua de consumo humano el alto contenido de estos puede generar malestar. Éste es un indicador de la efectividad de tratamientos biológicos y físicos de aguas residuales (Massol, 2002). Una manera de encontrar la concentración de estos sólidos es gracias a la medición de la conductividad pues existe relación entre estos dos parámetros, siempre y cuando no se cuente con aguas hipersalinas pues la presencia de iones afecta la conductividad (Massol, 2002).

Conductividad: La conductividad es una medida que permite establecer la capacidad de una solución acuosa para conducir la electricidad, esta habilidad depende de la presencia de sales disueltas (iones), y la concentración de estos en la solución. Ésta depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y temperatura ambiental. (Massol, 2002).

Esta medida dada en micro Siemens ($\mu\text{s/cm}$), es usada en los ensayos de calidad de agua ya que permite relacionar indirectamente la presencia de impurezas en el agua, debido a que cuando el agua es pura, su conductividad es prácticamente nula y a medida que ésta sufre un proceso de contaminación, aumenta la presencia de iones en la solución y por lo tanto su conductividad (American Water Works Association (AWWA), American Public Health Association (APHA), and Water Environment Federation (WEF), 2012).

2.3 Parámetros de calidad del agua

Se considera un agua contaminada cuando una descarga residual agrede el equilibrio ecológico natural. “Los contaminantes pueden ser patógenos, materia orgánica, sólidos, nutrientes, tóxicos, color, espuma, calor y materiales radiactivos” (Henry y Heinke, 1999).

Teniendo en cuenta lo descrito en la tabla E 2.5 del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y la ubicación del estudio, se deben evaluar los siguientes parámetros: Oxígeno disuelto, DBO₅, SST, SSV, DQO soluble y total, Nitrógeno total orgánico, pH, Fosforo soluble y particulado, y Acidez.

En desarrollo del proyecto de Grado y teniendo en cuenta los ensayos que podían desarrollarse en el laboratorio de calidad de aguas de la Pontificia Universidad Javeriana, se eligieron los ensayos que se relacionan y se describen a continuación:

- **DBO₅:** “Cantidad medida de oxígeno que requieren microorganismos aclimatados para degradar biológicamente la materia orgánica de las

aguas residuales. Es el parámetro de mayor importancia a tener en cuenta en la contaminación de agua, es un estimativo de la contaminación orgánica". (Henry y Heinke, 1999).

El ciclo del carbono (ver Ilustración 1), incide en la temperatura del contaminante, lo que a su vez influye en los valores obtenidos en los ensayos de DBO₅, debido a los procesos químicos o biológicos de oxidación presentes en el agua.

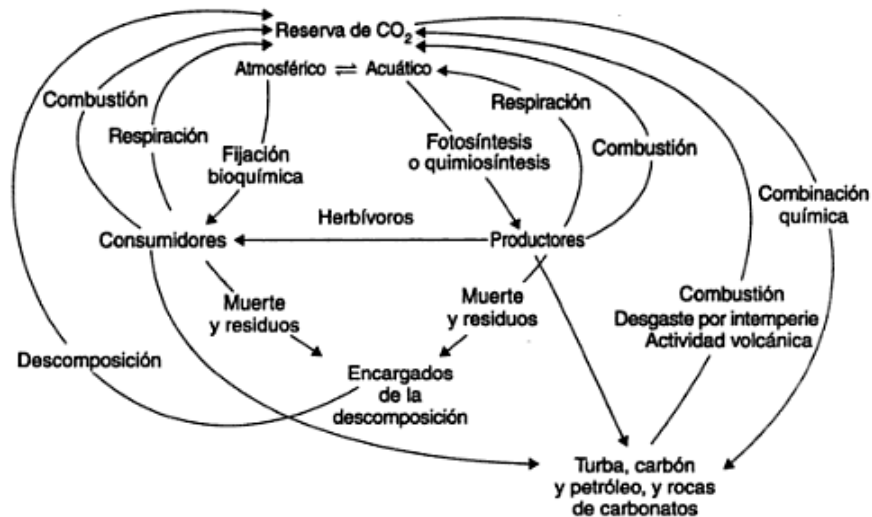


Ilustración 1 . Ciclo del carbono. Fuente: Kormondy (1969)

- **DQO:** “La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, que son oxidables en condiciones operatorias definidas.

La medida corresponde a una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, ya sea su origen orgánico o inorgánico.

La determinación de DQO debe realizarse rápidamente después de la toma de muestras, para evitar la oxidación natural” (Fernández Gonzales y Dolores Curt, 2004).

- **Nitrógeno total orgánico:** Este parámetro se encarga de medir la fracción orgánica del nitrógeno, este elemento químico en condiciones normales se presenta como un gas, es el principal componente de la atmósfera y de gran importancia en estudio debido a que a partir del nitrógeno orgánico se derivan diferentes formas del nitrógeno como lo son nitratos, nitritos y amonio, los cuales tienen un efecto negativo en el medio ambiente y salud humana.

En el agua y el aire se puede encontrar el nitrógeno como nitratos o nitritos, estos son conocidos por traer diferentes consecuencias en la salud humana, los primeros producen bajo almacenamiento de vitamina "A", los segundos reaccionan con la hemoglobina de la sangre y disminuyen el funcionamiento de la glándula de la tiroides, ambos producen nitrosaminas, una de las causas más comunes de cáncer. Estos últimos son utilizados por el hombre en fertilizantes, o como conservantes en la comida (Sainz Sastre, 2007).

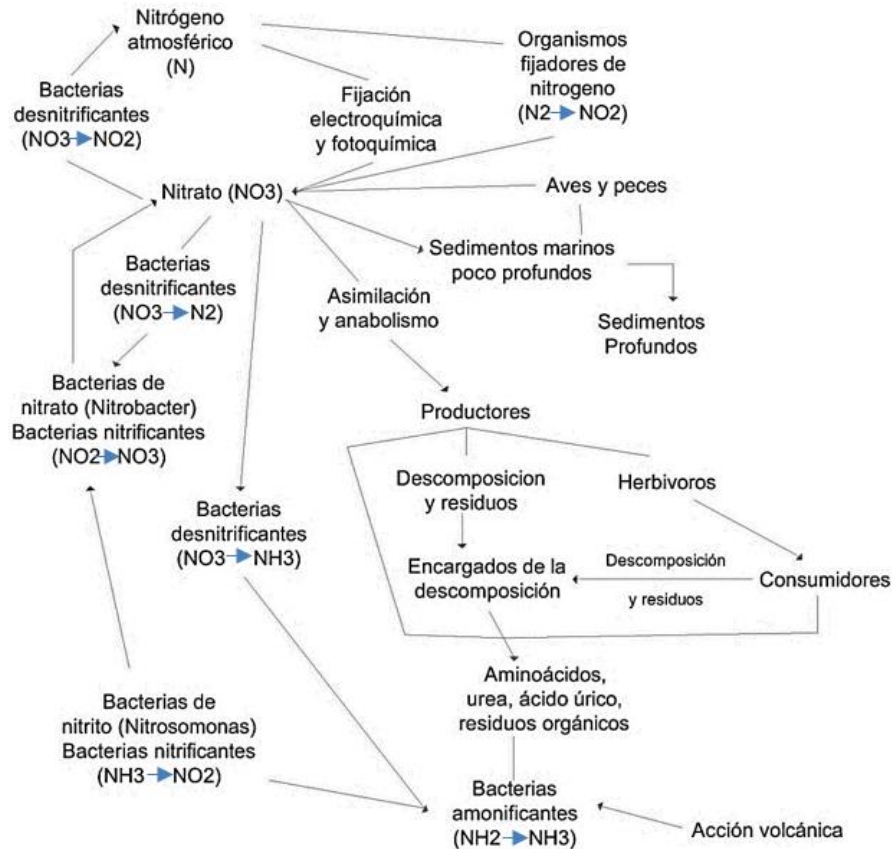


Ilustración 2. Ciclo del nitrógeno. Fuente: Kormondy (1969)

El nitrógeno, como se mencionó anteriormente, puede presentarse como amonio, el cual es característico de aguas residuales urbanas, éste puede oxidarse volviéndose nitrito y luego nitrato (Sainz Sastre, 2007), ver ilustración 2. La presencia de nitritos es indicador de materia fecal, al igual que los nitratos, pero estos últimos además se encuentran en fertilizantes, estiércol, y residuos líquidos de tanques sépticos. (Sainz Sastre, 2007).

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** “Hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual”. (*IDEAM, 2007*).

Sólidos en suspensión totales, este parámetro incluye componentes inorgánicos (arenas, limos, arcillas) y fracción orgánica (grasas, aceites). Se determinan por análisis granulométrico clásico. Altas concentraciones impiden la penetración de luz, disminuyen el oxígeno disuelto y limitan el desarrollo de la vida acuática. (*Bureau Veritas, 2008*).

- **Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV):** son aquellos que pueden ser volatilizados cuando los sólidos suspendidos totales son incinerados a $500\pm 50^{\circ}\text{C}$. (*Tchobanoglous, Burton y Stensel, 2003*)

2.4 Modelo de Calidad Qual2k

Qual 2k es un modelo matemático desarrollado por *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, y es considerado como una herramienta computacional que tiene como fin evaluar la calidad de una corriente de agua tomada como un cuerpo receptor que es sometida a diferentes descargas contaminantes (*Chapra, 2008*).

Dicha evaluación se realiza por medio de la solución de ecuaciones de transporte de masa y de reacción por el método de diferencias finitas en donde el modelo divide la corriente de agua en pequeños elementos y para cada uno de estos realiza el análisis de ecuaciones (*Manual de documentación del programa QUAL2K*), asumiendo para esto que los componentes o mecanismos con los que trabaja en las ecuaciones de transporte son advección y dispersión y que la corriente sufre un proceso de mezcla homogéneo lateral y verticalmente.

Éste tiene la capacidad de realizar las simulaciones permitiendo la entrada de múltiples descargas de desechos, flujos tributarios y variaciones en los flujos de entrada y de salida (*Chapra, 2008*).

El modelo Qual 2k tiene la capacidad de realizar la simulación en dos estados: steady state (estacionario) o time-variable (dinámico), el primer estado se refiere a cuando las condiciones no cambian en el tiempo (pero si existe la variación en el espacio), una condición de equilibrio en donde el flujo y la calidad de agua no puede tener variación a medida que pasa el tiempo, y el segundo estado es cuando las condiciones del flujo y calidad pueden variar en el tiempo como por ejemplo los cambios producidos en los procesos por culpa de las variaciones de la temperatura durante el día (*WRDMAP, 2010*). Para este caso se utilizó la solución de las ecuaciones en el estado steady state (estacionario) ya que éste

permite simular una condición en la cual se presenta una descarga continua y constante (*Castillo y Espinoza, 2005*) que es equivalente en esta aplicación a la descarga de lixiviado producido por el relleno sanitario Doña Juana y vertido al río Tunjuelo.

La aplicación de un modelo de calidad debe tener en cuenta que se debe establecer un volumen de control, conocer las entradas y salidas en las fronteras de dicho volumen y, conocer las características del transporte dentro del sistema establecido. (*Monerri y Doménech, 2001*).

La finalidad del uso del modelo es conocer para los parámetros evaluados su distribución espacial, con el propósito de mostrar su avance dentro del cuerpo receptor, viendo con este resultado si hay procesos de transformación y/o transporte que indiquen cambios en las concentraciones del contaminante o si su resultado en el avance de la masa es persistente a lo largo del sistema.

El modelo trabaja con ecuaciones de balance de masa, que cumplen con la premisa de la conservación de la masa, la ecuación diferencial que describe la concentración de un contaminante al cabo de un tiempo, en un determinado diferencial de volumen está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_k$$

Ec. 4 (Monerri y Doménech, 2001)

Dónde:

C: concentración del contaminante en mg/L o mol/L.

T: tiempo en s.

u_x, u_y, u_z : componentes del vector velocidad real del agua, velocidad longitudinal, transversal y vertical en m/s.

E_x, E_y, E_z : componentes del tensor de dispersión en el seno del fluido, coeficientes de dispersión longitudinal, transversal y vertical en m^2/s .

S_k : fuente o sumidero del contaminante, por unidad de volumen de fluido y de tiempo en $mg/(L \cdot s)$ ó $mol/(L \cdot s)$.

El primer término de la ecuación se refiere a la acumulación de materia en el diferencial de volumen, originado por transporte convectivo-dispersivo. El segundo término se refiere a transporte por convección, la última parte del segundo término, representa entradas y/o salida del contaminante.

Se escogió el uso de Qual2k, debido a que es un software de uso libre. Adicionalmente, la información secundaria con la que se cuenta refiere al uso de

dicho software, por lo que era conveniente usarlo durante la alimentación, simulación y resultados.

2.5 Modelo de transito hidráulico Hec Ras

Como se mencionó en la sección 2.1 el comportamiento de la sustancia, en este caso contaminante, depende además de su reactividad, de la velocidad que lleve en el tramo, por lo que fue necesario implementar un modelo de transito hidráulico, que visualice el movimiento de la masa de agua, mostrando la variación de velocidades en el sistema y su cambio a través del tiempo y las condiciones hidrológicas que impliquen un cambio del caudal en el sistema.

Al igual que el software de calidad, éste también es de uso libre y permite el uso directo de información secundaria del mismo río, utilizando las secciones transversales del río Tunjuelo, se realizaron simulaciones a partir de los caudales obtenidos de la información secundaria para validar las velocidades y profundidades hidráulicas obtenidas en campo. En el Capítulo 6, se presentan los resultados obtenidos con ayuda del modelo Hec Ras.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.

3.1 Localización del Relleno Sanitario Doña Juana.

El Relleno Sanitario Doña Juana fue inaugurado el 1 de noviembre de 1988, pertenece a la ciudad de Bogotá, está ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar en terrenos ubicados en la cuenca superior del río Bogotá, es atendido por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) quien es la entidad encargada de la disposición y manejo de los residuos sólidos de la capital y, del control, manejo y tratamiento de los lixiviados que se generan por la descomposición de los residuos.

“Desde ese momento hasta el día de hoy el relleno ha estado en funcionamiento y en constante crecimiento con un área aproximada de 560 Ha (sin tener toda el área ocupada en operaciones) según el documento del Plan de Cumplimiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana, realizado por UAESP, dentro de esta área se encuentran diferentes zonas (en total 8) que se han construido y han empezado a operar, así como también algunas culminaron con su vida útil y quedaron fuera de operación por lo cual fueron clausuradas.” (Pontificia Universidad Javeriana, 2010).

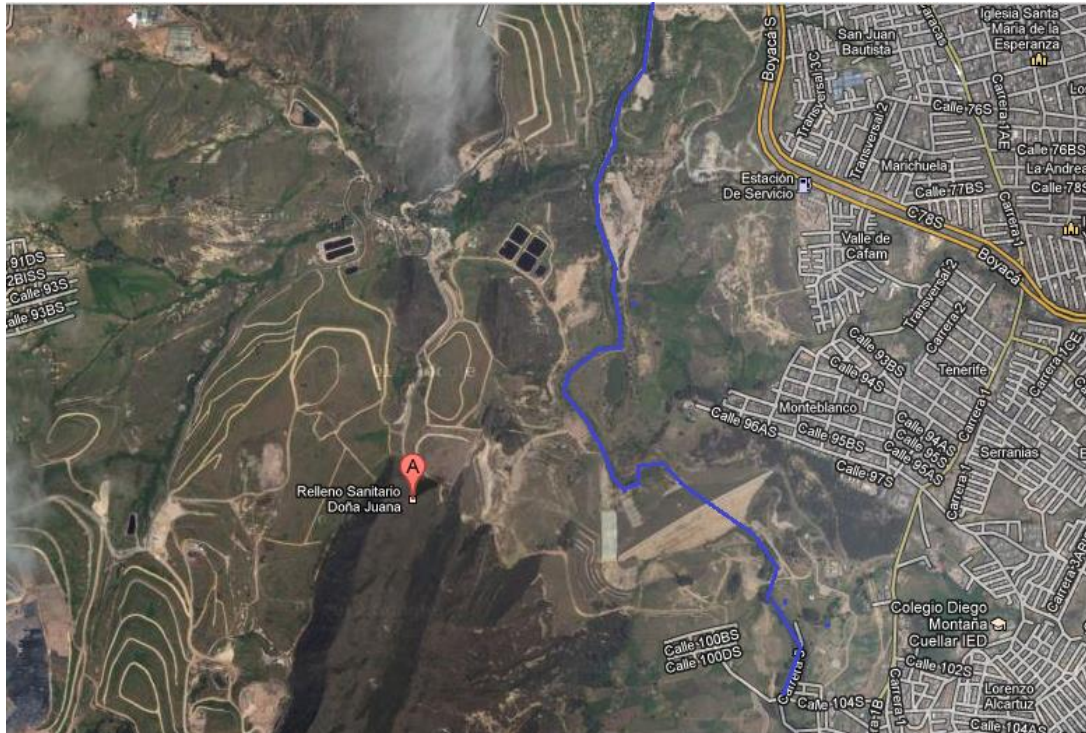


Ilustración 3. Localización del Relleno Sanitario Doña Juana. Tomado de: Google Earth

Cuenta con una planta de tratamiento de lixiviado (PTL) dónde “el caudal de lixiviado proveniente de las distintas zonas del relleno sanitario, hace su ingreso al tratamiento por medio de una cámara de entrada y dos pondajes, de capacidad de 2000 m³, de allí el lixiviado es dirigido al tratamiento físico-químico, el cual se encuentra compuesto por tres sistemas que trabajan en paralelo. Inmediatamente después de la salida del físico-químico se realiza una aplicación de cal, con el fin de neutralizar el pH.” (UAESP, 2010-2011) dichos procedimientos se explican más adelante en el inciso 3.1.1.



Ilustración 4. Planta de Tratamiento de Lixiviados PTL del Relleno Sanitario Doña Juana.

“Una vez realizada esa primera etapa del tratamiento, parte del caudal es enviado a final de proceso, considerando que el sistema de tratamiento siguiente no cuenta con la capacidad para tratar todo el lixiviado generado. El lixiviado es ingresado al sistema de predesnitrificación, posteriormente al reactor biológico aerobio y enseguida al sistema de posdesnitrificación, finalmente pasa a la decantación secundaria. El efluente tratado es mezclado con el proveniente del tratamiento físico químico y es vertido al río.

El lodo producido en los diferentes tratamientos es dirigido a un espesador de lodo por gravedad, luego a un sistema de deshidratación y finalmente es dispuesto en una celda de lodos.” (UAESP, 2010-2011).

De acuerdo al último informe del concesionario encargado de la operación de la PTL, *El Plan de Choque realizado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos*, actualmente se tratan 50m³/h a través de toda la planta y 14 m³/h en el tratamiento físico-químico, originalmente, el tratamiento fue diseñado para un caudal medio diario de 29 m³/h y un caudal punta diario admisible de 50 m³/h.

A continuación se remite al informe previamente mencionado para conocer a fondo los procesos que se realizan en la PTL Doña Juana. (UAESP, 2010-2011).

3.1.1 Estructura de entrada y derivación

Esta estructura fue construida posterior a la entrada en operación de la planta, como parte de las obras complementarias adicionadas.

Esta estructura está compuesta por una canaleta de entrada a los pondajes donde se encuentra instalado un medidor de nivel tipo radar que permite la medición de los caudales de entrada a los pondajes. Sin embargo, debido a la generación de espuma en este punto, las mediciones de caudal por este método no han resultado ser precisas.

Adicionalmente en la estructura de entrada a los pondajes se cuenta con un vertedero triangular provisto de una regleta para el cálculo de caudales con la respectiva curva de calibración.

Cuenta con dos bombas sumergibles ubicadas en la caja de entrada, las cuales dirigen el caudal de retorno hacia el proceso físico químico, a su salida se encuentra ubicado un caudalímetro.

Los sistemas de conducción existentes en la estructura de entrada y la derivación están compuestos por válvulas reguladoras de caudal con el fin de variar la operación de acuerdo a los requerimientos del momento.

Pondajes de entrada

Inicialmente se diseñó un pondaje con capacidad de 1500 m³ para un tiempo de retención hidráulico máximo de 2 días, minimizando la generación de olores. Existen dos pondajes ubicados previo al tratamiento, con el fin de regular los caudales de entrada a la PTL, disminuyendo el pH y los sólidos suspendidos.

Pozo de bombeo

El pozo de bombeo cuenta con dos bombas sumergibles de capacidad de 38 m³/h y un caudalímetro para la medición del caudal dirigido a los tratamientos.

3.1.2 Línea de Agua

3.1.2.1 Tratamiento Físico Químico No.1

Este tratamiento fue diseñado inicialmente en serie con el Tratamiento Físicoquímico 2, sin embargo, con las adecuaciones realizadas posteriormente a la puesta en marcha, el sistema fue acondicionado para trabajar en paralelo.

El tratamiento físico-químico está compuesto por una cámara de mezcla rápida, una estructura de floculación, compuesta por dos cámaras, y un decantador. Inicialmente se aplica la dosis de hidróxido de calcio, ácido sulfúrico y polielectrolito. Sin embargo, la aplicación de polielectrolito no se realiza actualmente.

El objetivo del tratamiento físico químico en este caso es, mediante la adición de hidróxido de calcio, alcanzar la precipitación, coprecipitación y/o adsorción de los metales pesados en forma de hidróxidos alcanzando pH inicialmente de 8 a 8,5, y posteriormente de 10,5 a 11. Donde metales como hierro, níquel, cadmio, aluminio, cromo trivalente y zinc son precipitados y removidos en el proceso de decantación posterior. Adicionalmente se presenta oxidación química de parte de la materia orgánica.

En cuanto a la capacidad de bombeo de los compuestos químicos nunca representó ser un problema, considerando que la capacidad instalada supera de manera significativa la necesaria para los caudales superiores.

Mezcla rápida

El consumo de hidróxido de calcio ha disminuido considerando el aumento de pH 7,5 a 8,6 en el lixiviado afluente. Anteriormente las dosis de diseño era equivalente a 10 Kg/m³ y ahora se adicionan entre 1,2 y 3,6 kg/m³.

Para el caudal de diseño el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) es de 2 min, sin embargo considerando que este caudal es aumentado por la adición de cal y la recirculación de lodos primarios a mezcla rápida, este tiempo se ve disminuido a aproximadamente 1.5 min. TRH menores a 1.1 min demostraron dificultad en el incremento de pH para la hidrólisis de metales, se incrementa el consumo de hidróxido de calcio, se incrementan las incrustaciones por ende el volumen de la estructura. Por lo anterior no se recomienda superar los 35 m³/h en las unidades de mezcla rápida.

Floculación

El diseño original contempla un TRH mínimo de 20 min. Para el caudal de diseño supera los 30 min, no obstante al igual que en la estructura de mezcla rápida el caudal se encuentra incrementado por las mismas razones, entonces el TRH real resulta equivalente a 26 min, lo que garantiza una buena operación en el sistema. En este caso tampoco se deben superar los 35 m³/h considerando que se presentan deficiencias en la sedimentación de las partículas en el clarificador primario.

Clarificador circular

Este clarificador tiene un diámetro de 9 m y tiene la función de permitir la separación entre los flocs generados y el agua residual tratada, mediante la sedimentación de dichas partículas. El lodo sedimentado es dirigido mediante bombeo a la estructura de espesado o puede ser recirculado a la cabeza del proceso. El caudal de lodo generado y dirigido al siguiente tratamiento Físico Químico puede ser medido con el caudalímetro instalado en la tubería a la salida del pozo de lodos del decantador.

Dentro de un análisis realizado se encontró que a caudales menores de 30 m³/h se encontraban las mejores eficiencias en remoción de DBO₅, y que superando los 35 m³/h las eficiencias disminuían en alrededor de un 50% (*Consortio Hera Nam Velzea, 2003*).

3.1.2.2 Tratamiento Físico Químico No.2

Fue diseñado con el objetivo de mejorar las remociones hasta ese momento alcanzadas por el anterior tratamiento, especialmente en los metales pesados, adicionalmente fue utilizado como tratamiento posterior al tratamiento biológico, con el fin de mejorar efluente tratado. No obstante, las estructuras que lo componen han sido utilizadas principalmente como tratamiento único y paralelo de parte del caudal que ingresa a la PTL, considerando la falta de capacidad con la que cuenta la PTL.

Las estructuras implementadas son idénticas a las del tratamiento Físico Químico 1, sin embargo cambia el sistema de decantación primaria por gravedad por un sistema Lamelar.

Clarificador Lamelar

En cuanto a este clarificador, fue pensado para operarlo en serie con el tratamiento fisicoquímico, o en paralelo como pulimiento del efluente final. Su caudal de diseño es el mismo de las estructuras anteriores 30 m³/h. Se recomienda no sobrepasar las limitaciones hidráulicas antes descritas en los procesos mencionados (*Consortio Hera Nam Velzea, 2003*).

Neutralización

Este proceso consiste en la aplicación de ácido sulfúrico (H₂SO₄) con el fin de estabilizar de nuevo el pH alrededor de 8 para el ingreso al tratamiento biológico.

Al igual que con la adición de hidróxido de calcio, el diseño suponía una adición de ácido sulfúrico en el rango de 2 a 6 kg/m³, y ésta ha disminuido, a valores entre 0,19 a 1,6 kg/m³, lo anterior considerando que la recirculación de lixiviado logra disminuir el pH previo al paso a la predesnitrificación.

En este caso las condiciones hidráulicas obedecen al comportamiento observado en las estructuras anteriores mostrando deficiencias en el tiempo de contacto, para los casos de caudales superiores a 50 m³/h.

La estructura para la neutralización está compuesta por dos cámaras, en donde se realiza el ajuste de pH, en una de ellas se hace con el fin de entregar al tratamiento biológico y en la otra con el fin de hacer el vertimiento final en los casos en los que se realiza únicamente el tratamiento físico químico o se desea mejorar la calidad del tratamiento biológico antes de realizar el vertimiento.

3.1.2.3 Tratamiento Biológico

El tratamiento biológico concebido en la PTL está compuesto por distintas estructuras que se denominan, reactor de predesnitrificación, reactor de lodos activados y decantador, y reactor de desnitrificación. Estos componentes pretenden disminuir las concentraciones de materia orgánica presente, especialmente en términos de DBO₅ y Nitrógeno.

Predesnitrificación

Se trata de un reactor circular, con un diámetro de 17 m y una profundidad de 3,5 m y cuenta con un agitador sumergible, el cual permite mantener las condiciones anóxicas necesarias para la transformación de nitratos a nitrógeno gaseoso. Fue diseñado para un tiempo de retención hidráulico no mayor a 4 horas, y se alimenta del lixiviado proveniente del proceso físico químico posterior

a la neutralización, de lixiviado recirculado del postdesnitrificador y del lodo generado en la decantación secundaria el cual es recirculado, lo anterior permite cumplir con las condiciones de materia orgánica carbonácea necesaria para la actividad de esta clase de microorganismos y con la recirculación de lodo conservar la comunidad bacteriana, respectivamente.

Previo a esta unidad se proyectó hacer la adición de ácido fosfórico (H_3PO_4) con el fin de alcanzar la concentración de fósforo necesaria para la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos, razón por la cual en ocasiones se realizan análisis de la relación de P/DBO_5 existente a la salida de este proceso.

Reactor Biológico

La planta dispone de dos reactores de aireación extendida de sistema de carrusel, con un área anóxica para desnitrificación. El volumen de estas estructuras alcanza los 15600 m³.

Los reactores son del tipo aireación extendida y flujo de pistón, con un tiempo de retención celular que ha variado entre 20 y 50 días, con Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) de 4210 mg/L en condiciones máximas. El sistema cuenta con aireación a través de difusores de burbuja fina y 4 agitadores sumergibles, 1 medidor de potencial redox, 2 medidores de concentración de oxígeno por reactor.

Postdesnitrificación

Se trata de un reactor anóxico que tiene como fin la desnitrificación una vez se ha nitrificado el amonio presente en el afluente, por tanto evita la presencia de nitros en el decantador secundario, mejorando las eficiencias del mismo.

Decantación secundaria

Existe un decantador secundario que separa el efluente tratado de los lodos generados durante el proceso de nitrificación y desnitrificación. Este decantador tiene un diámetro aproximado de 12 m.

3.1.2.4 Tratamiento de Lodos

Espesamiento

Se cuenta con un espesador por gravedad el cual recibe los lodos de exceso provenientes de la decantación primaria (decantador por gravedad y decantador lamelar) y la decantación secundaria. El lodo sale espesado en un 5%.

Deshidratación

Una vez el lodo es espesado es dirigido a la deshidratación mediante centrífugas. El sistema cuenta con tres centrífugas 2 con capacidad de 10 m³/h y 1 con capacidad de 20 m³/h.



Ilustración 5. Canal de transporte de lixiviado de la Planta de Tratamiento de Lixiviado (PTL) al río Tunjuelo.

Una vez pasado por todos estos procesos el lixiviado tratado es conducido por un canal en concreto (Ilustración 5) que baja hasta el Río Tunjuelo. Allí la descarga se realiza de manera puntual, en el lateral sur occidental del río, esta descarga genera una pluma marcada como se puede ver en la Ilustración 6, esta pluma estableció los primeros puntos de toma de parámetros de campo de la primera campaña, como se verá en la sección 4.3.



Ilustración 6. Descarga puntual del lixiviado en el río Tunjuelo



Ilustración 7. Movimiento de la masa contaminante a lo largo de la zona de estudio.

La Ilustración 7 muestra la pluma mencionada anteriormente, se ve claramente como la masa contaminante transita dentro del río, mientras ocurre el proceso de mezcla. Posteriormente ésta se mezcla y se hace homogénea, por lo menos en términos visuales (color). En las secciones 4.3 y 4.4, se determinará la evolución del contaminante en términos de parámetros de campo y calidad de agua.

3.2 Río Tunjuelo.



Ilustración 8. Curso del Río Tunjuelo. Sentido del Flujo derecha a izquierda.

La cuenca del río Tunjuelo cuenta con un área aproximada de 36280 hectáreas que están divididas en zona rural (72.6%), urbana (25.4%) y del Parque Nacional Natural Sumapaz (2%), el río cuenta con una longitud de 53 kilómetros y durante su curso pasa por las localidades de Bosa, Ciudad Bolívar, Sumapaz, Tunjuelito y Usme (*Secretaría Distrital De Ambiente, 2007*).

Dicha cuenca está dividida en tres (*Secretaría Distrital De Ambiente, 2007*):

- Cuenca alta: Aquí se encuentra el nacimiento del río en la Laguna de los Tunjos y abarca hasta el Embalse de La Regadera.
- Cuenca media: Comprende desde el Embalse de la Regadera hasta la zona de canteras, dentro de ésta se encuentra ubicado el Relleno Sanitario Doña Juana y el vertimiento de lixiviados al río Tunjuelo, zona de interés en este trabajo.
- Cuenca baja: abarca desde la zona de canteras hasta la desembocadura del río Bogotá.

El río Tunjuelo solía ser de uso potable pero con el paso del tiempo y la llegada de población que se asentaba aledaña al río empezó a volverse un río de descarga de residuos domésticos, por lo que su uso potable aguas abajo se perdió. Paralela a esta problemática aparecen las canteras y las curtiembres en barrios cercanos al Tunjuelo, volviéndolo un río cuya recepción de contaminantes es elevada. A esto se le suma el caso objeto de este proyecto de grado, que comprende los lixiviados vertidos por el Relleno Sanitario Doña Juana localizada en las cercanías del río cuyo afluente de contaminantes, conforma la problemática a desarrollar.

El Río Tunjuelo, el segundo más grande de Bogotá, como se mencionó vive una problemática de carácter ambiental severo, “Dos de los problemas más críticos y recurrentes (sin incluir las sequías) que ha sufrido esta cuenca son, por un lado, la urbanización ilícita y desorganizada, y por el otro, las inundaciones como efecto de este proceso de desarrollo de la ciudad” (Osorio, 2008).

La ocupación ilegal de terrenos sufre en la actualidad un proceso de expansión urbana hacia el norte de la localidad de Usme y el occidente de Bosa, zona rural de la cuenca (Secretaría Distrital De Ambiente, 2007).

La parte que preocupa más sobre la contaminación del cauce, es debido a su llegada al río Bogotá, este río genera problemas sanitarios y ambientales que pasan de ser locales a nacionales al pasar del Tunjuelo, al Bogotá y posteriormente al Magdalena. “Tomando como referencia la normatividad aplicable a vertimientos realizados a fuentes superficiales en Bogotá (resolución 1074/97 y 1596/01 DAMA), los vertimientos realizados por la planta de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana no cumplen lo establecido en ésta.” (Secretaría Distrital De Ambiente, 2007)

El estudio en campo dejó en evidencia los cambios dramáticos en la lámina de agua en intervalos de tiempo cortos debido a cambios grandes en la hidrología, entre días los caudales aumentaban o disminuían haciendo que dicha lámina aumentara en más de medio metro, lo que trae como consecuencia la pérdida de la visibilidad de la pluma en el río, dado que existe una mezcla visualmente más corta. Posteriormente se evalúan dichas distancias de mezcla (Capítulo 5), para concluir sobre éstas.

3.3 Zona de Estudio.



Ilustración 9. Ubicación de la zona de estudio. En azul, conducción del lixiviado.

Una vez localizado el punto de vertimiento, se decidió realizar las mediciones de los parámetros de campo y calidad para obtener el punto base antes del vertimiento, 10 metros aguas arriba del mismo.

Posteriormente en cada campaña se tomaron determinaciones importantes de la evaluación de los parámetros de campo. Esas decisiones consistieron en llevar los sondeos desde el punto de vertimiento hasta 100 metros aguas abajo del mismo, estos procesos se explican en la sección 4.3.

El acceso al lugar del sitio donde se realizaron las mediciones es una calle afirmada utilizada para el paso de volquetas que van a las canteras contiguas, de allí y descendiendo por la ladera se llega a la orilla del río. Las mediciones hechas in-situ, contaron con la ventaja de tener partes planas que permiten garantizar la buena toma de las mismas.

Durante el tiempo que se realizaron las mediciones se presenciaron diferentes condiciones climáticas, dichos eventos permiten observar los cambios hidráulicos y de calidad que se presentan en el río Tunjuelo.

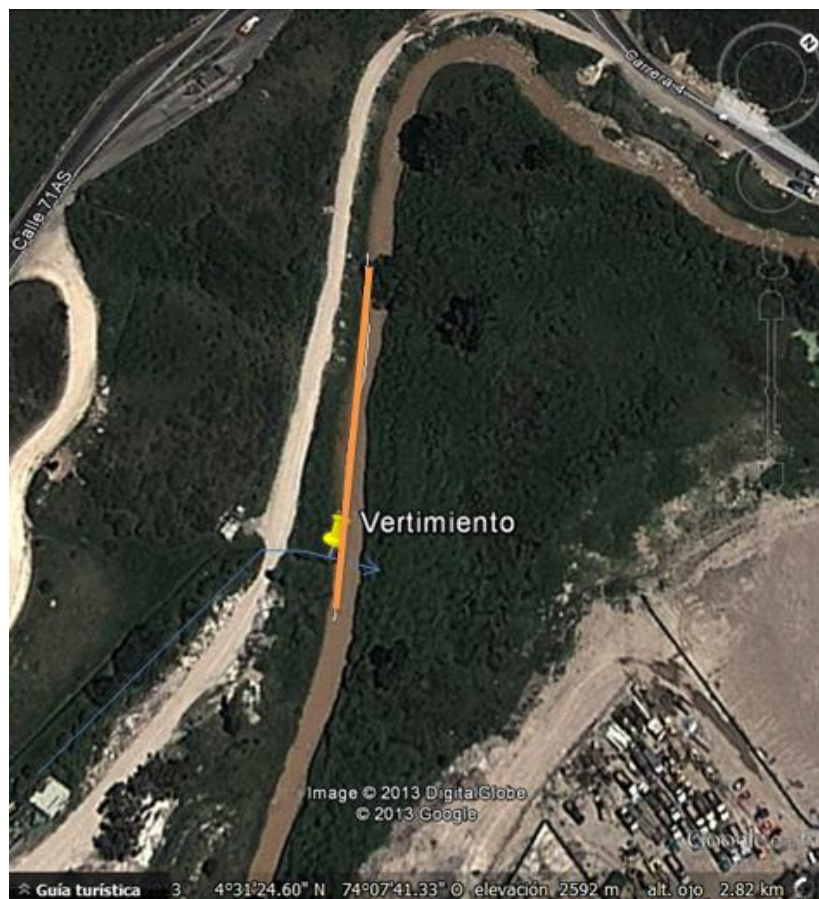


Ilustración 10. Conducción y vertimiento del lixiviado (azul), Zona de muestreo (naranja)

Estos cambios climatológicos, entre otros son un factor causante de la variabilidad de los caudales en la cuenca, además de los problemas ambientales ya conocidos por la contaminación de la capital que afectan directamente la climática de la misma, afectando a los cuerpos de agua porque se genere inundación, o sequía que genera la escasez del recurso hídrico.

La Ilustración 10 muestra en azul el canal que transporta lixiviados desde la PTL hasta el río, y en naranja se muestra la zona final de toma de mediciones realizada sobre una longitud de 110 metros.

Es necesario mencionar que el río Tunjuelo en su paso por el punto de vertimiento de la PTL ya viene con carga contaminante, esto producto de asentamientos humanos, fábricas, canteras, etc., que descargan sus efluentes sin ningún tipo de tratamiento en forma directa al río, como se observa en la Ilustración 11.



Ilustración 11. Presencia de canteras y asentamientos urbanos aguas arriba del vertimiento.

Por lo anterior se hace necesario conocer las condiciones actuales previas al vertimiento producido por el relleno sanitario con el fin de evaluar las condiciones posteriores aguas abajo una vez se han vertido los efluentes tratados en la PTL.

El río cuenta con un perfil de velocidades superficial que se marca más en época de sequía, pues los lugares de sedimentación son más visibles y en los bordes del río se encuentran velocidades menores que en el centro del río, diferente a la temporada de lluvias, donde el perfil se vuelve un poco más homogéneo, en el capítulo de aforos se explicara con más detalle este comportamiento.

4. MEDICIONES DE CAMPO.

4.1 Procedimientos.

4.1.1 Aforos

Realizar un procedimiento de aforo en un río, se refiere a la medición del caudal que transporta una corriente de agua, en este caso el caudal del Río Tunjuelo.

Para ello existen diferentes métodos de medición entre los cuales se encuentra uno llamado “Método de área y velocidad” que es comúnmente utilizado en diferentes proyectos, gracias a los buenos resultados que se pueden obtener. (Ortega-Gaucin, 2012)

Es por eso que para este trabajo se optó por utilizar este método, que consiste en medir la sección transversal del canal del río, calcular el área correspondiente por donde pasa el flujo de agua y finalmente medir la velocidad promedio de la

corriente, con estos datos se prosigue a aplicar la ecuación de caudal (*Ortega-Gaucin , 2012*):

$$Q=V*A$$

Ec. 5

Dónde:

Q: caudal en m³/s,

V: velocidad promedio en m/s, y

A: área de la sección transversal del río en m².

La medición de la velocidad es un procedimiento que puede ser realizado de diferentes formas, entre ellas están las mediciones con molinete y las mediciones con flotadores, en la primera, el molinete es un elemento con una hélice, que se introduce en la corriente y gira según la velocidad que tenga ésta, y para la determinación de la velocidad se aplican fórmulas matemáticas que relacionan el número de vueltas que realiza la hélice en un tiempo determinado.

En la segunda los flotadores son elementos u objetos que como su nombre lo indica flotan en el agua, por lo que estos son conducidos por la corriente y adquieren una velocidad aproximada a la que tiene el río, ahora para obtener dicha velocidad se define una longitud en el río y se lanza el flotador para determinar el tiempo que le toma recorrer dicha distancia, este tipo de mediciones genera gran variabilidad en los resultados, poniendo una incertidumbre de los resultados obtenidos, este problema se soluciona medianamente con la repetición de la medición en varias ocasiones (*Ortega-Gaucin , 2012*).

Para este proyecto de grado se consideró trabajar con el método de flotadores debido a que el sitio de mediciones cuenta con ciertas ventajas, como por ejemplo:

- En el sector de análisis del río se dispone de una lámina de agua no muy profunda , situación producida al existir una gran sedimentación que hace que el fondo del canal sea cercano a la superficie de la lámina de agua, generando que este método tenga una aproximación aceptable, ya que no existe una gran diferencia entre el perfil de velocidades en la parte superior del río y una zona más profunda, dando como resultado un valor de velocidad media en el río cercano a otro realizado por un método con más precisión como lo es el aforo con molinete.
- Resulta mucho más económico y fácil de acceder que un molinete, por lo que este procedimiento se puede realizar un gran número de veces hasta llegar a un comportamiento deseado (*Campos Aranda, 1998*).
- Por último, el río al ser bastante estable en sus niveles y en el comportamiento durante su tránsito, en determinada condición climática

hace que los flotadores no sufran alteraciones durante su viaje que puedan afectar las medidas.

Las campañas de aforos se realizaron en los mismos días, que se realizaron las tomas de parámetros de campo; los días, los datos tomados y los resultados calculados se presentan en la sección 4.5., este hecho permite relacionar directamente los parámetros medidos con el caudal presente en el río.

Como procedimiento se estableció una distancia específica en el río que se encontraba dentro del sector de análisis, la cual fue delimitada en tramos iguales con estacas con el fin de garantizar el seguimiento de los flotadores, posteriormente se lanzaban los flotadores aguas arriba de la sección de análisis para garantizar que los flotadores adquieran la velocidad media con la que transita la corriente (*Campos Aranda, 1998*), (Ver Ilustración 12) este ejercicio se realizó repetidamente y se hizo en diferentes secciones del río (laterales y centro del río) para determinar cuál era su variación entre estas zonas y así finalmente encontrar la velocidad media de la corriente por medio del tiempo en que le tomaba al flotador pasar de un punto a otro.



Ilustración 12. Flotadores en el río

Finalmente para obtener las secciones del Río Tunjuelo, se tomó el informe realizado por la EAAB (*Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2009*). Con la ayuda de un GPS en la zona del vertimiento se obtuvieron las coordenadas del sector de análisis y así finalmente con éstas se buscaban las secciones correspondientes (Ver Ilustración 13).

Ya seleccionadas las secciones transversales del río, se procedió a sacar el área de la sección transversal del informe mencionado, allí se hicieron las pruebas de velocidad y finalmente la aplicación de la ecuación de caudal.

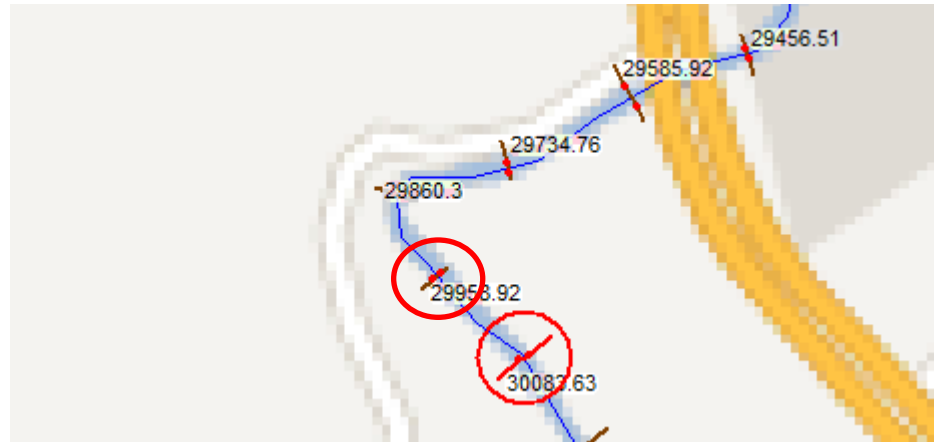


Ilustración 13. Secciones obtenidas con información secundaria

4.1.2 Toma de parámetros de campo y muestras

La toma de muestras de los parámetros de campo (conductividad, pH y temperatura y SDT) del río Tunjuelo, se realizó por medio de dos equipos de propiedad de la Pontificia Universidad Javeriana, un potenciómetro YSI Ph300 y un conductímetro YSI S300 (Ver Ilustración 14), las mediciones se realizaron in situ y con resultados instantáneos, en diferentes días y en diferentes puntos del río que iban siendo establecidos según los resultados y lo observado en campo; este análisis de días y puntos en donde se tomaron los datos se encuentra consignado en la sección 4.3 donde se da una explicación más detallada.

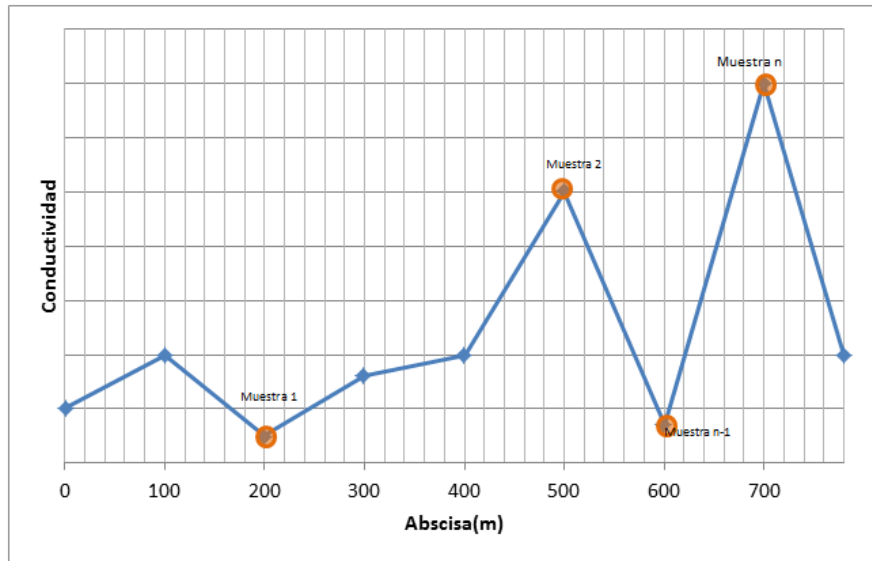


Ilustración 14. Equipos para toma de parámetros de campo. Conductímetro (Izq.) pHmetro (der.)

Posteriormente, con la valoración observada de los tiempos de viaje, efectuada a partir de la campaña de aforo y la medición de la conductividad en las diferentes estaciones definidas en el río, se logró marcar e identificar el tránsito de la onda de contaminantes por medio de gráficas de conductividad vs abscisa, a lo largo del tramo de estudio en el río Tunjuelo.

Es de vital importancia mencionar, que ésta fue la información base para la asignación de los puntos de monitoreo de los parámetros complejos y más costosos como son los que se obtuvieron de los ensayos de laboratorio (DBO₅, DQO, SST, SSV, y Nitrógeno total orgánico).

En la campaña de parámetros complejos se realizaron muestreos puntuales en los puntos que específicamente se identificaron con las campañas de aforo y parámetros de campo. Es decir, a partir de la predicción del tiempo de viaje, se “marcaron” 5 puntos en el cauce y a 3 diferentes horas obteniendo como resultado 15 datos, donde se esperará el paso de la onda de contaminantes tomando muestras sucesivas, siguiendo el aumento de la conductividad en el punto correspondiente. Llevando al laboratorio solamente las muestras tomadas más cercanas al valor máximo y mínimo local de la onda de conductividad identificada, lo anterior se presenta en la gráfica a continuación que ejemplifica el escenario de muestreo (la gráfica no representa la realidad de los datos).



Gráfica 1. Niveles de Conductividad vs Abscisa del río.

Los puntos representados en la gráfica, denominados como muestra 1, 2, n, muestran las inflexiones de la conductividad en las cuales se decidió tomar muestreos puntuales para obtener los ensayos de calidad en el laboratorio.

Para la realización de los ensayos se siguieron los protocolos acordados con el laboratorio de calidad de agua de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, en donde se estableció la entrega de 15 muestras a las cuales el personal encargado les realizó los ensayos correspondientes y dió resultados siguiendo las siguientes normas.

ENSAYOS	NORMA
Sólidos suspendidos totales	SM 2540 D
Sólidos suspendidos volátiles	SM 2540 E
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	SM 5210 B
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SM 5220 D
pH (Potencial de hidrógeno)	SM 4500-H+B
Nitrógeno total orgánico	SM 4500-Norg B
Conductividad	SM 2510 B

Tabla 1. Ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Javeriana

4.2 Resumen de campañas de medición de parámetros de campos.

Se realizaron 3 campañas de monitoreo en tres días, el día 1, 8 y 15 de Abril del 2013; y 1 campaña conjunta de parámetros de campo y muestreo el día 22 de Abril del 2013, esto con el fin de generar una descripción y una caracterización aceptable del comportamiento de los parámetros de campo (Conductividad, pH, T° y SDT), los cuales se reestructuraban con base en los resultados obtenidos en dichos parámetros para cada campaña, (Descripción más detallada del análisis remitirse a la sección 4.3).

Para cada una de estas campañas se realizaron sub campañas donde se pretendía seguir a la masa contaminante y así ver como era su comportamiento dentro del río en un intervalo de tiempo y de distancia.

Es así que el día 1 de Abril, como un inicio de las campañas, se realizaron 4 sub campañas (8:30, 9:08, 12:30, 13:15, respectivamente) cada una con un mínimo de 11 puntos de medición distribuidos en el tramo del río en estudio, cada 2 a 5 metros dependiendo de la topografía del terreno para el acceso a la orilla del río, esto con el fin de obtener la primera aproximación y comprender el comportamiento del río.

Para esta primera campaña se presentaron condiciones de clima seco y soleado durante todo el día y se realizó el estudio en una longitud total de 31 metros del río, tomando como referencia 10 metros aguas arriba del punto de vertimiento, y 21 metros aguas abajo de éste (Ver Ilustración 15), (el análisis del tramo de estudio se encuentra en el inciso 4.3.1.).

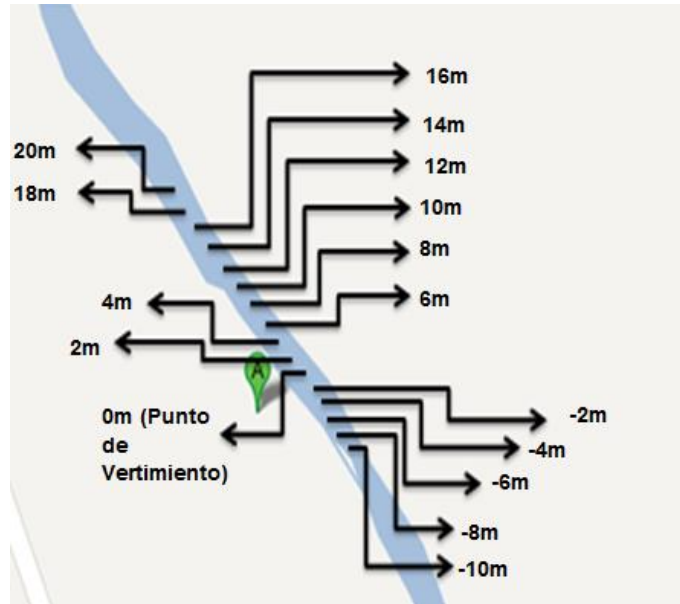


Ilustración 15. Esquema #1 de abscisas en el río

El día 8 de abril se contó con características similares de clima seco y soleado, con lloviznas eventuales, pero cortas y suaves. En consecuencia con lo observado en la campaña anterior, se reestructuró la campaña 2, tomando 6 sub campañas (8:17, 9:41, 11:00 a.m. y 12:56, 2:01 y 3:00 p.m.), compuestas por 9 puntos de medición cada 5 metros, y uno de ellos tomado a los 67 metros del punto de vertimiento con el fin encontrar una zona de estabilización de la mezcla del río con el lixiviado, por lo que para esta campaña se realizó en total un análisis del tramo con longitud total de 77 metros, divididos 10 metros aguas arriba y 67 aguas abajo (Ver Ilustración 16), (el análisis del tramo de estudio se encuentra en el inciso 4.3.2.).

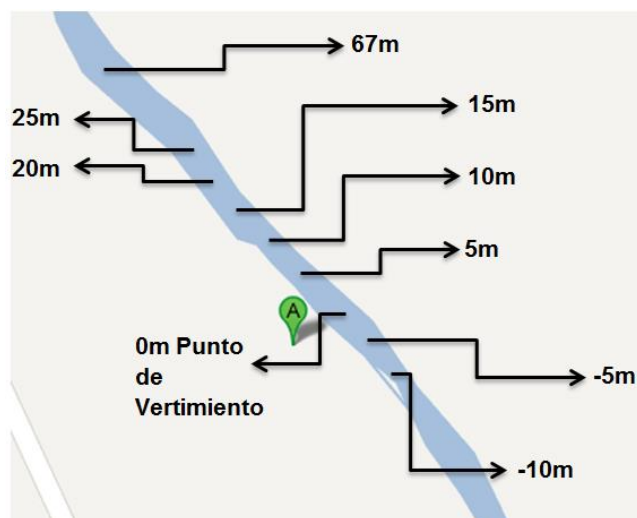


Ilustración 16. Esquema #2 de abscisas en el río

El día 15 de abril presentó un clima soleado, se tomaron 5 sub campañas (9:30, 10:30, 11:40 a.m. y 1:30, 2:40 pm), compuestas por 18 puntos de medición que están separados 5 y 10 metros. En esta campaña se buscó realizar un tramo de mayor longitud para lograr observar el comportamiento final de la mezcla del lixiviado y el río, es decir, donde se logre ver una estabilización en los parámetros de campo medidos, es por eso que para esta campaña se llegó a los 100 metros aguas abajo del punto de vertimiento y 10 metros aguas arriba, dando un total de longitud analizada de 110 m (Ver Ilustración 17) (el análisis del tramo de estudio se encuentra en el inciso 4.3.3).

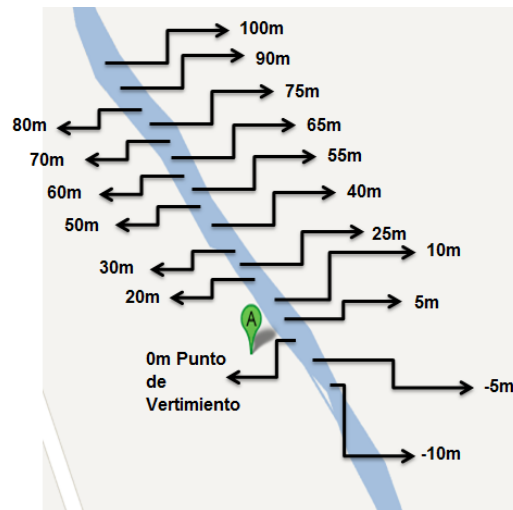


Ilustración 17 Esquema #3 de abscisas en el río

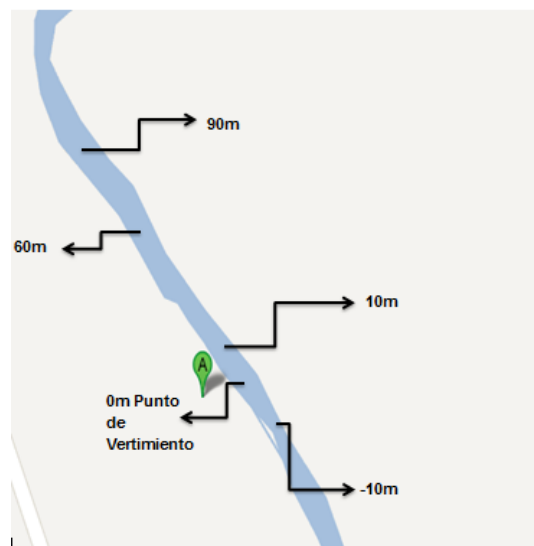


Ilustración 18. Esquema de abscisas de muestreo puntual en el Río

Por último el día 22 de abril se presentó un clima diferente, lluvioso y con los niveles del río crecidos, se tomaron 5 sub campañas (9:20, 10:30, 12:30, 3:00, 3:50), compuestas dos de ellas por 18 puntos de medición que son los mismos

puntos referenciados en la campaña del 15 de abril (Ilustración 17) que determinaban el tramo de análisis que se quería, y las tres sub campañas restantes en 5 puntos que fueron establecidos por los resultados obtenidos de las conductividades medidas anteriormente y que corresponden a los puntos para realizar el muestreo (Ilustración 18), (el análisis del tramo de estudio se encuentra en el inciso 4.3.4.).

4.3 Análisis de campañas de medición de parámetros de campo.

4.3.1 Primera campaña

Se realizó, el 1 abril de 2013, un sondeo general del efluente para conocer sus características y se midió el tramo en el que se podía ver la pluma contaminante, encontrando una longitud entre los 18 y 21 metros hasta que el lixiviado borraba su pluma, se presentó clima seco y soleado.

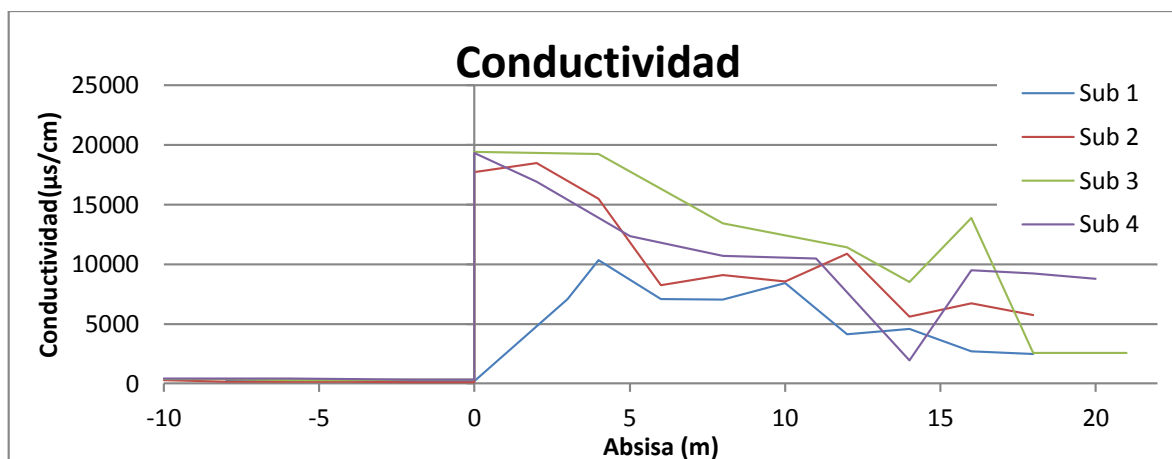
La campaña empezó a las 8.30 am., y la medición realizada en cada sub-campaña se realizó en los horarios presentados en la Tabla 2, para cada una de éstas se medía la condición aguas arriba del vertimiento, con el fin de comparar y establecer las diferencias presentadas en los parámetros de campo, en las diferentes ubicaciones, como lo es en el punto del vertimiento y en puntos aguas abajo separados aproximadamente cada 2 metros.

Los parámetros medidos son pH, conductividad, temperatura y sólidos disueltos totales (SDT) aunque éste último se realizó únicamente en las últimas dos sub-campañas, debido a que en la primera sub-campaña se vió un cambio drástico en la medida de la conductividad en el punto de vertimiento. Con la segunda sub-campaña, se buscó comprobar los órdenes de magnitud y el comportamiento obtenido en la primera sub campaña, se tomó la decisión de medir SDT ya que este parámetro tiene una relación de afinidad proporcional en su comportamiento, basada en que a medida que sube la conductividad la cantidad de SDT debe también subir y lo mismo para el caso contrario (*Sánchez, 2007*).

Por último se encontró un alza en la temperatura en el punto del vertimiento (ΔT ($^{\circ}\text{C}$) media=28.8) que con el paso de la distancia disminuye y regresa a una condición aproximada a la inicial entre 16°C - 18°C , y se presentó además un aumento en la conductividad (Δ Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$) media=15880) en el punto de vertimiento. Finalmente se evaluó con el conductímetro los valores de SDT para ver su comportamiento en el efluente del Río Tunjuelo frente a la descarga de lixiviados y así verificar que existiera la relación proporcional con el comportamiento de la conductividad.

Sub Campaña	Hora inicio
Sub 1	08:31:00 a.m.
Sub 2	09:54:00 a.m.
Sub 3	12:00:00 p.m.
Sub 4	03:36:00 p.m.

Tabla 2. Sub campañas. Primera Campaña

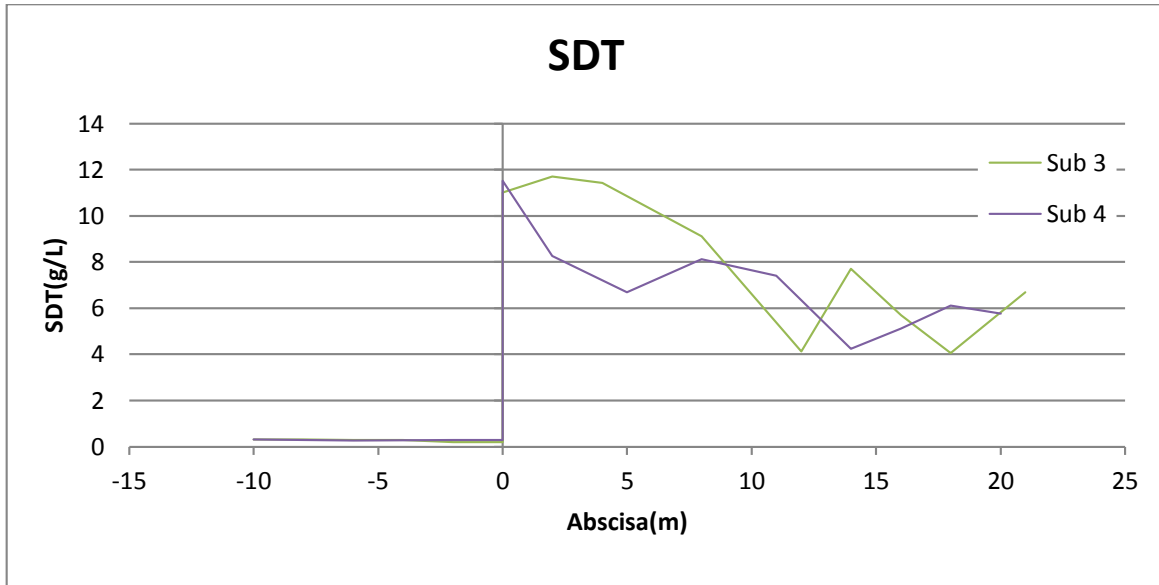


Gráfica 2. Conductividad. Primera campaña

El abscisado toma como cero el punto de vertimiento, localizado en el punto con latitud $4^{\circ}31'23.21''N$ y longitud $74^{\circ}7'41.05''O$, los puntos negativos en las gráficas, refieren a los puntos aguas arriba de dicho vertimiento.

Como es de notar la conductividad incrementa su orden de magnitud de 10^2 a 10^3 y a 10^4 , viéndose muy influenciado por el efluente agregado del lixiviado, lo que permite concluir que el efluente agrega un gran contenido de impurezas al río que elevan la conductividad del agua.

La condición aguas abajo se mantiene en los mismos órdenes de magnitud, sin embargo se logra observar que tienden a disminuir al recorrer distancia en el río. Un parámetro relacionado con la conductividad son los sólidos disueltos totales (SDT), cuyo comportamiento debe ser similar al de la conductividad puesto que ésta última se rige por la concentración de sales en el agua, y los principales sólidos disueltos en el lixiviado son sales minerales (*Jiménez Cisneros, 2005*).

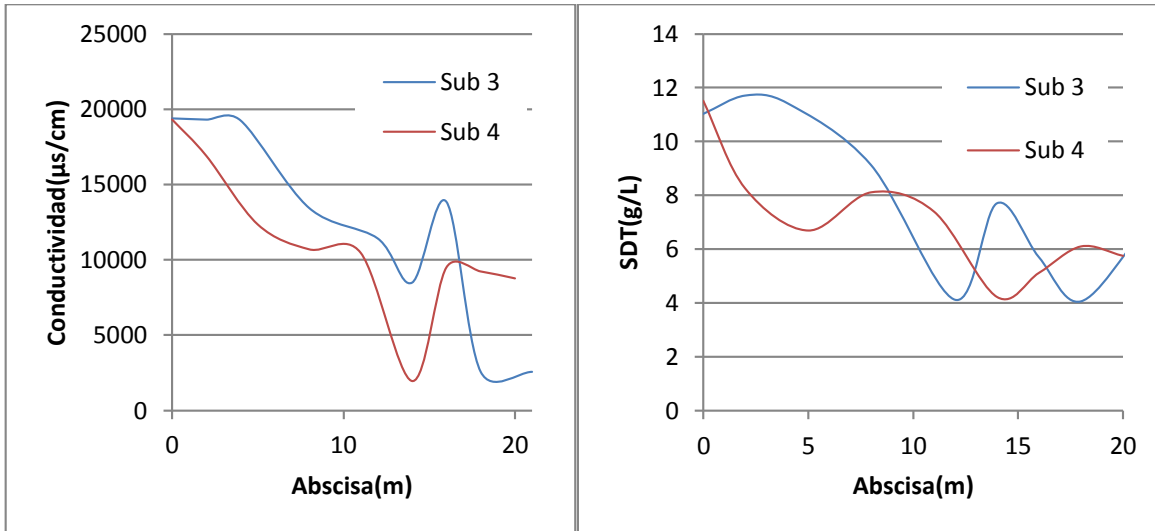


Gráfica 3. Sólidos Disueltos totales. Primera Campaña

La Gráfica 3, muestra el comportamiento mencionado anteriormente y se puede ver que la relación entre el parámetro de conductividad y los SDT es proporcional. Se puede evidenciar que en el punto de vertimiento los valores incrementan y posterior a éste tienden a ir disminuyendo, para esta gráfica, sólo se comparan la sub-campaña 3 y 4, pues en las anteriores no se realizaron mediciones de SDT, con los cuales comparar.

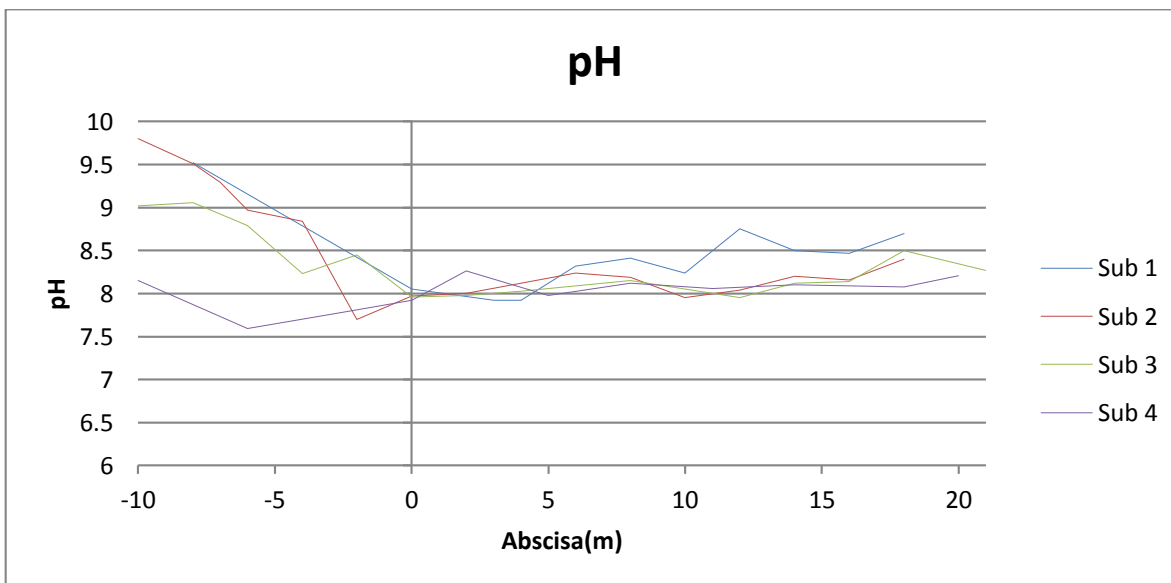
En la Gráfica 4, se muestra más detallada la semejanza del comportamiento entre SDT y Conductividad, a partir del punto o abscisa donde se da la descarga del lixiviado en el Río Tunjuelo, se puede evidenciar en dicha grafica que ambos parámetros tienden a disminuir su valor, es decir se mantiene dicha relación proporcional, dada por la presencia de sales en el fluido.

Es posible determinar en las gráficas cómo se van disminuyendo las concentraciones de los parámetros a medida que se alejan de su punto de vertimiento lo cual es característico de un comportamiento de un fenómeno de difusión en donde el transporte de la masa de lixiviado causa el esparcimiento de la mancha en el río, diluyéndose en el tiempo y en el espacio (*Chapra, 2008*).



Gráfica 4. A. Comparación Conductividad ($\mu\text{s/cm}$) (Izq.). B. SDT (der.). Primera Campaña.

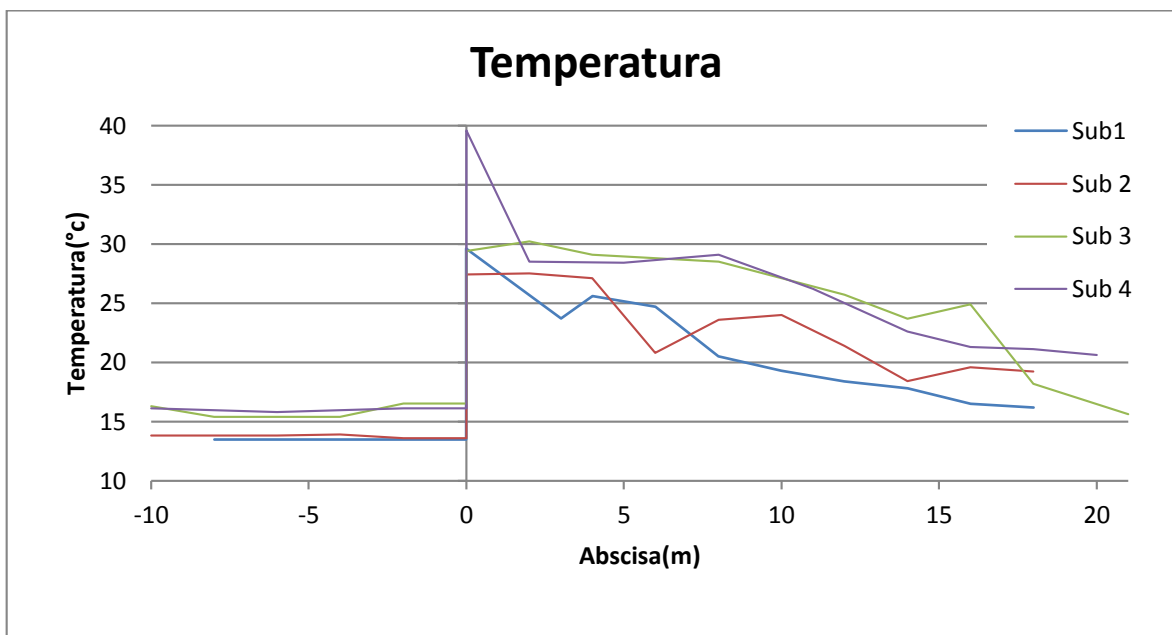
Los otros parámetros evaluados son pH (Gráfica 5) y temperatura (Gráfica 6) el pH se muestra en un rango poco variable aguas arriba, mantiene un rango entre los 7.5 y 9.8, posiblemente debido a las descargas industriales a las que es sometido antes de la descarga de lixiviado, haciendo al fluido de pH básico lo que quiere decir que la presencia de iones de hidrógeno es más baja que la presencia de iones hidróxido por lo tanto tiene más oxígeno que una solución que sea acida. (Starr y Taggart, 2008).



Gráfica 5. pH Primera campaña

La temperatura por su parte se altera bruscamente, pues el vertimiento viene con temperaturas elevadas lo que puede hacer que en este punto del río se presenten dos situaciones, la primera es que esta alta temperatura ayude al

desarrollo de microorganismos presentes en el agua generando problemas de salubridad en el agua (*Jiménez Cisneros, 2005*). Y la segunda situación que la solubilidad de oxígeno disuelto sea baja (*Sánchez, 2007*), posteriormente durante el proceso de mezcla esta temperatura se ve obligada a descender hasta la temperatura que tiene el río aguas arriba debido a procesos de convección. (*Betancur Grajales, 2003*).



Gráfica 6. Temperatura. Primera Campaña

4.3.2 Segunda campaña

Se realizó, el 8 abril de 2013, obteniendo los resultados descritos, se propuso llevar la toma de parámetros hasta que se alcanzara una magnitud similar a la condición aguas arriba del vertimiento, esto con el fin de buscar observar que el proceso de mezcla se estabilizó.

En la campaña anterior se había obtenido un progreso de la masa contaminante, pero no se había evaluado hasta qué punto se mantenía diferente la conductividad, únicamente se había establecido toma de puntos hasta donde se podía ver claramente la pluma del lixiviado. Por esto se decidió seguir aguas abajo con la medición de los parámetros ya mencionados (pH, Temperatura, Conductividad y SDT).

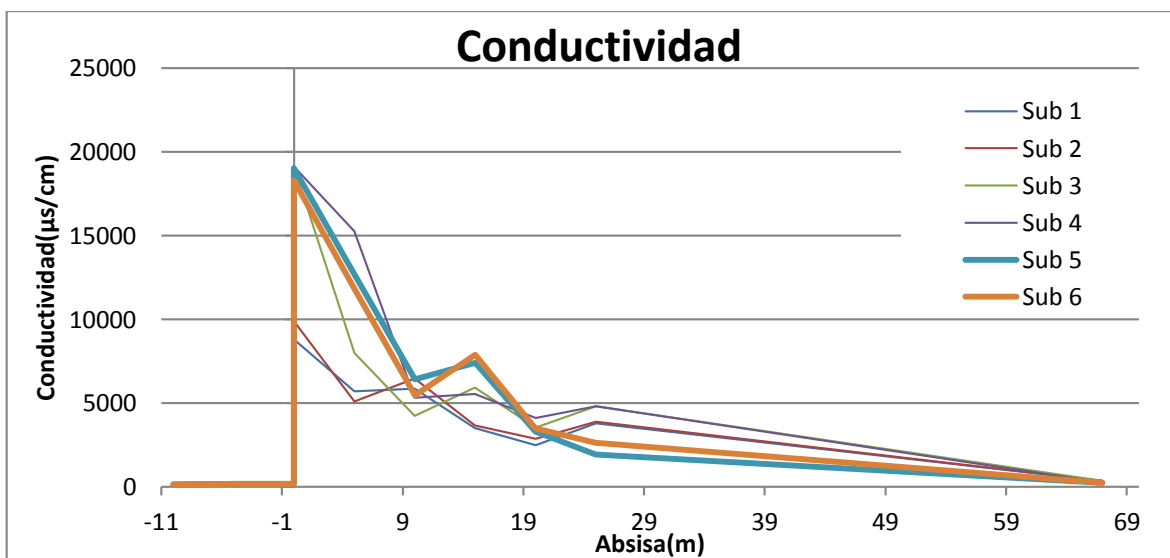
Para esta campaña se realizaron 6 sub-campañas en los horarios definidos y mostrados en la Tabla 3, en los cuales se analizaron 77 metros del río, 10 metros aguas arriba del vertimiento y 67 metros aguas abajo del vertimiento, las características climáticas presentadas este día fueron muy similares a las presentadas en la primera campaña.

Sub Campaña	Hora inicio
Sub 1	08:17:00 a.m.
Sub 2	09:41:00 a.m.
Sub 3	11:00:00 a.m.
Sub 4	12:56:00 p.m.
Sub 5	02:01:00 p.m.
Sub 6	03:01:00 p.m.

Tabla 3. Sub campañas. Segunda Campaña

Como se muestra en la Gráfica 7, la conductividad se mantiene debajo de 10000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en el tiempo de medición anterior a medio día, luego los valores incrementan un poco menos del doble, pero llegan a rangos entre 18300 y 19100 $\mu\text{s}/\text{cm}$, estos valores nos permiten concluir que el vertimiento sale con una cantidad considerable de sólidos o impurezas en el agua que indican un nivel de contaminación alto (Jiménez Cisneros, 2005).

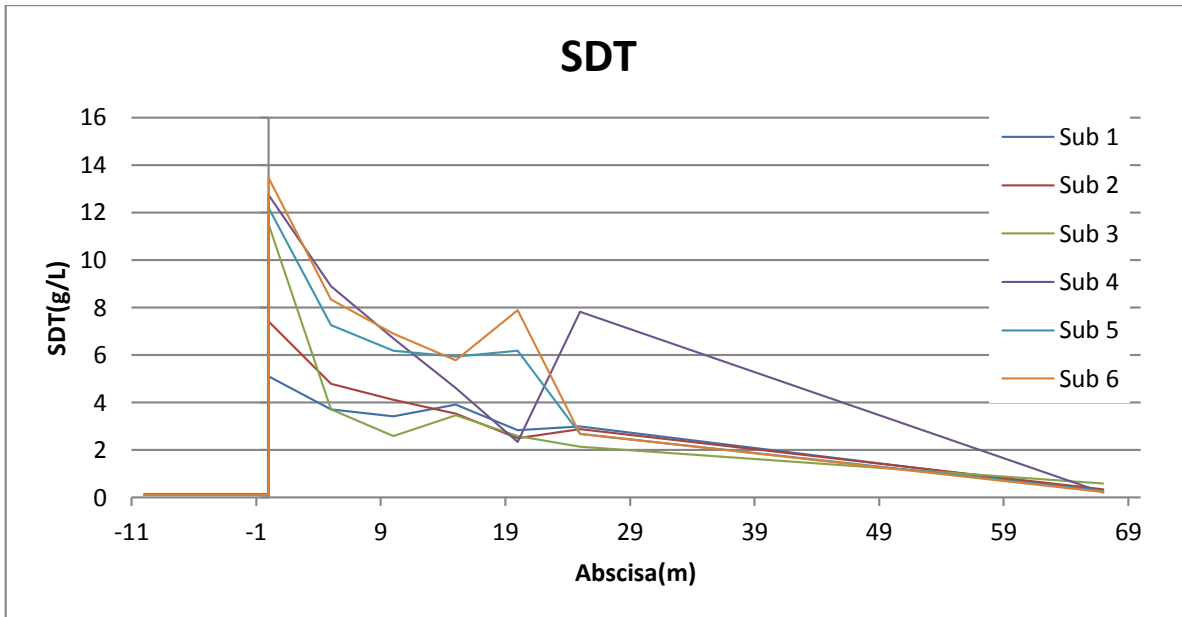
A partir de éste punto de vertimiento, empieza a disminuir el valor de conductividad, llegando a un nivel similar a la obtenida agua arriba del vertimiento, mostrando que el río asimila de una manera efectiva la carga recibida por parte de la planta y que su proceso de mezcla se va dando en una corta distancia.



Gráfica 7. Conductividad. Segunda Campaña

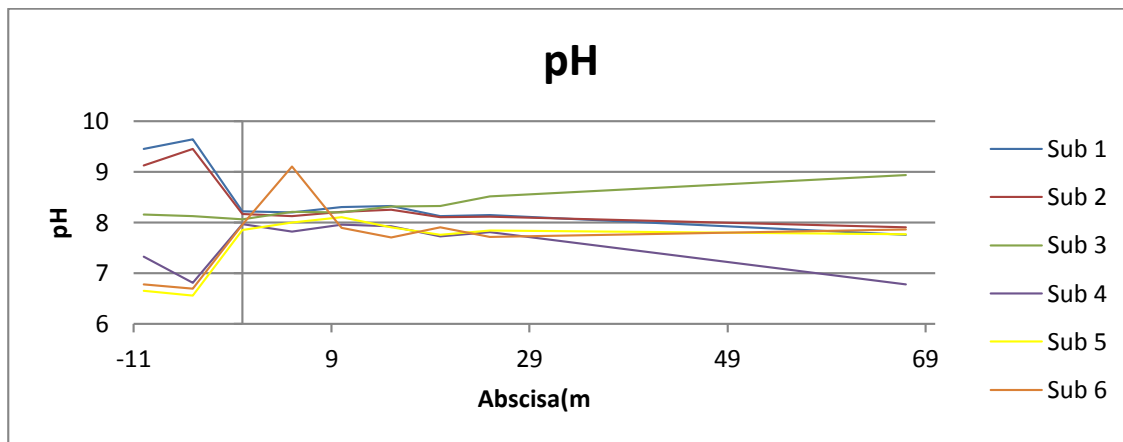
El comportamiento de los sólidos disueltos vistos en la Gráfica 8, de SDT, muestra en el tramo de mezcla inicial un descenso similar a la baja de conductividad, fenómeno descrito igualmente en la primera campaña, momento en el cual el río ya ha pasado parte del proceso de mezcla con el lixiviado vertido,

este comportamiento en los sólidos disueltos continua igual, descendiendo, e igualmente consigue llegar al orden de magnitud obtenido aguas arriba, aunque con valores ligeramente mayores que es el comportamiento normal esperado que debería tener la corriente luego del proceso de difusión (*Chapra, 2008*).



Gráfica 8. Sólidos disueltos totales. Segunda Campaña

El pH, como en la anterior campaña oscila en valores similares, sin tener una tendencia marcada, está entre 6.5 y 9.6, como puntos máximo y mínimo antes del vertimiento y aguas abajo se encontró entre 6.8 y 8.9, como se observa en la gráfica 8, manteniendo siempre el flujo con un pH básico.

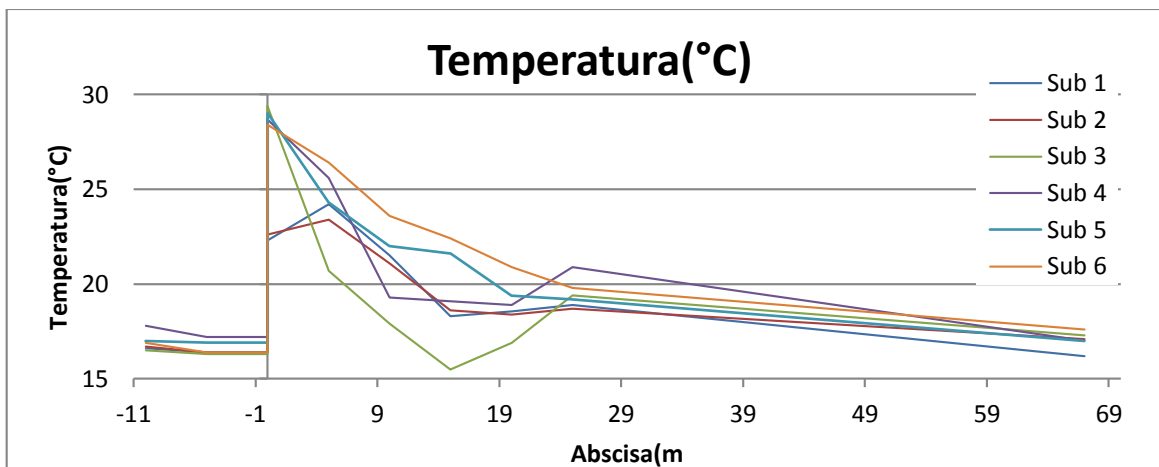


Gráfica 9. pH. Segunda Campaña

Se contó con clima seco este día, hubo pequeñas lloviznas, pero no afectaron drásticamente el nivel del río, la temperatura en el río como se muestra a

continuación aumento en las mediciones que se realizaron entre el medio día y las primeras horas de la tarde.

El pico que se muestra en la Grafica 10 sucede instantáneamente con el vertimiento de lixiviado, posteriormente se conserva el comportamiento de la campaña anterior, donde la mezcla entre el río y el lixiviado hace que éste último descienda su temperatura, hasta tener una temperatura similar por procesos de convección (Betancur Grajales. 2003), aunque unas décimas de grados centígrados más elevada, que la obtenida en la condición aguas arriba.



Gráfica 10. Temperatura. Segunda Campaña

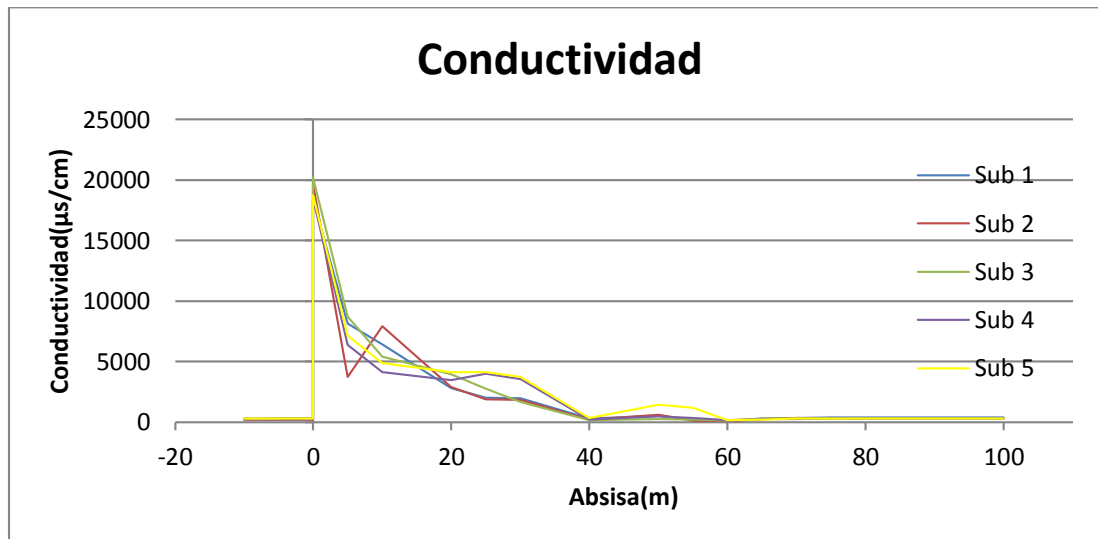
4.3.3 Tercera campaña

Realizada el 15 de abril de 2013, esta vez se planteó realizar mediciones que permitieran observar que la conductividad aguas abajo al aumentar su orden de magnitud se mantuviera estable en determinado punto del río, esa zona de estabilización fue la que se buscó durante esta campaña con la realización de 5 sub-campañas que estuvieron compuestas cada una por 18 puntos de medición separados con una distancia de 5 y 10 metros, dando como resultado un estudio de 110 metros del río divididos 10 metros aguas arriba del vertimiento y 100 metros aguas abajo del vertimiento.

Las horas en las que se realizaron las mediciones y sus denominaciones, se enuncian en la siguiente tabla:

Sub Campaña	Hora inicio
Sub 1	09:30:00 a.m.
Sub 2	10:30:00 a.m.
Sub 3	11:40:00 a.m.
Sub 4	01:30:00 p.m.
Sub 5	02:40:00 p.m.

Tabla 4. Sub campañas. Tercera Campaña

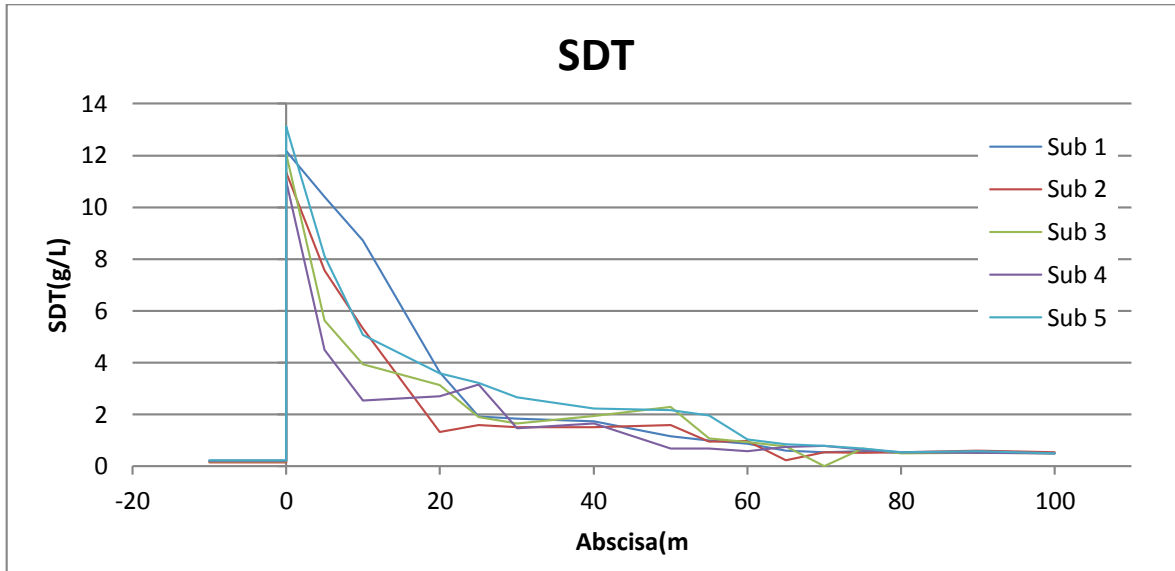


Gráfica 11. Conductividad (µs/cm). Tercera Campaña

Esta campaña mostró características climáticas similares a las dos anteriores en donde se tuvo tiempo seco y los niveles del río no se vieron alterados, por lo cual se obtuvieron comportamientos y magnitudes similares en los diferentes parámetros de campo con respecto a las anteriores campañas de medición.

La conductividad como se muestra en la Gráfica 11, desciende luego del punto de vertimiento su orden de magnitud de 10^4 a 10^2 , en la zona comprendida desde el punto de vertimiento hasta los 40 metros. La conductividad sigue su comportamiento proporcional a la gráfica de los SDT (Gráfica 12) como se esperaba dada la relación ya explicada en el Capítulo 2.

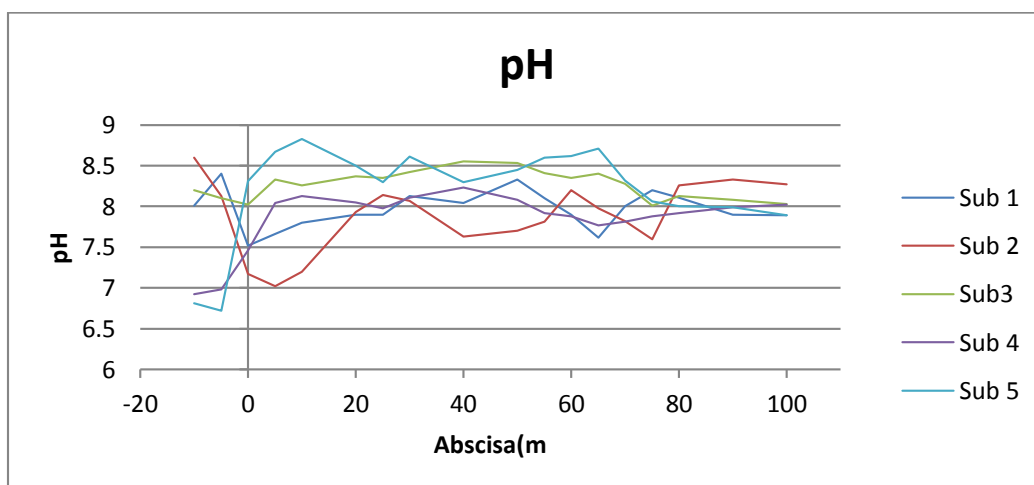
Aproximadamente a los 65 metros aguas abajo, se encuentra que el río vuelve a tener un orden de magnitud en los parámetros de conductividad y SDT que se habían obtenido aguas arriba del punto del vertimiento, estos valores aguas abajo finalmente quedan un poco mayores, debido a que al término del proceso de mezcla con la descarga de lixiviados, el río queda con un mayor grado de contaminación que para este caso de estudio es un incremento bajo.



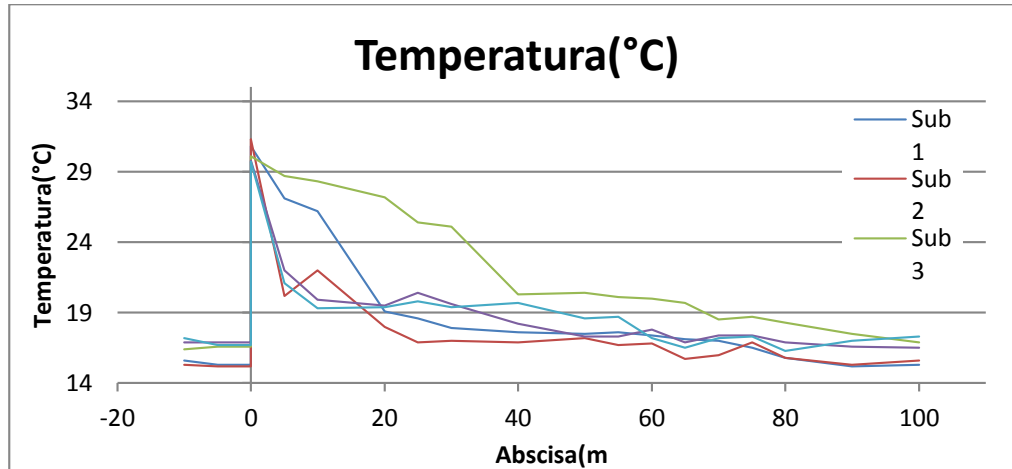
Gráfica 12. Sólidos disueltos totales. Tercera Campaña.

El pH y la temperatura, Gráfica 13 y Gráfica 14, respectivamente, continúan comportándose de manera muy parecida a las campañas anteriores. El pH oscila entre 6.7 y 8.7, manteniendo un pH básico como se ha venido mostrando, en las horas de la tarde se puede ver que hay un incremento en los valores de éste pero, no son muy altos llegando aproximadamente a valores de 8.85.

La temperatura incrementa como en las veces anteriores en el punto de vertimiento, pues los lixiviados vienen a una temperatura mayor que la del río, y finalmente por el proceso de convección que se da en el río aguas abajo, conlleva nuevamente un descenso de este pico conforme se avanza en el río (Betancur, 2003), en los 100 metros estudiados hacia aguas abajo.



Gráfica 13. pH. Tercera Campaña



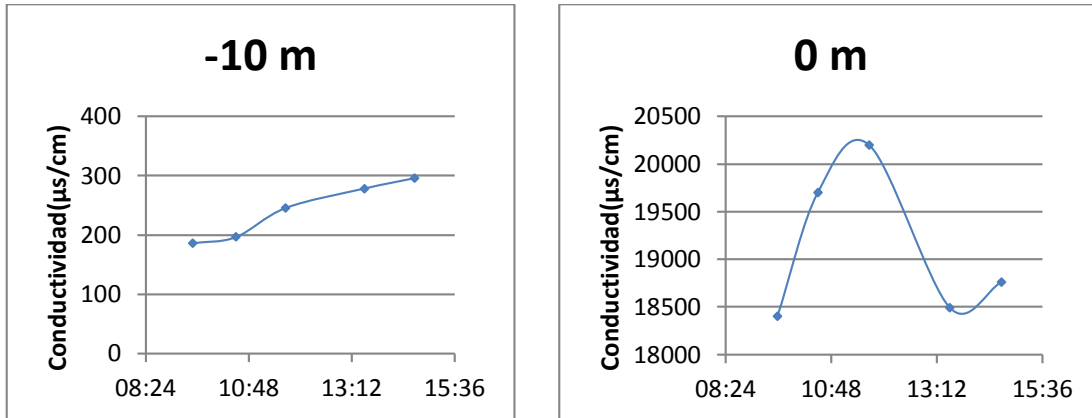
Gráfica 14. Temperatura (°C). Tercera Campaña

Al evaluar esta campaña, por medio de la realización de las gráficas de conductividad vs. abscisas y con la ayuda de la valoración del tiempo de viaje con las campañas de aforo en campo que permiten conocer el tránsito de la masa contaminante, se establecieron los puntos donde se tomarían los muestreos en la siguiente campaña, estos reflejaron condiciones que representaban momentos más altos y más bajos de contaminación identificados en el tránsito de conductividad en el espacio.

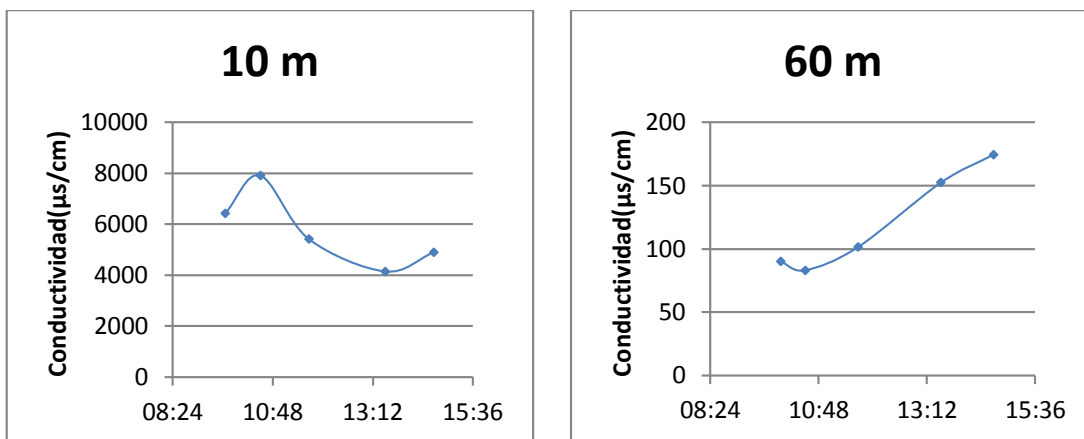
Se escogió 1 punto aguas arriba del vertimiento (-10m) para conocer las condiciones del río antes de ser vertido el lixiviado, el segundo punto es en el punto de vertimiento (0m), el tercer punto es 10 metros abajo del vertimiento para ver el tránsito de la masa contaminante dentro del río durante su mezcla, el cuarto punto se define 60 metros abajo donde la conductividad empieza su proceso de estabilización y se ve un aumento en relación a la condición inicial del río, además de que la pluma se pierde demasiado dentro de la masa del río.

El último punto se toma a los 90 metros desde el vertimiento, donde se ve en la Gráfica 11, una estabilidad bien definida en los valores obtenidos, con este punto se puede saber cuál es la condición final después de la mezcla.

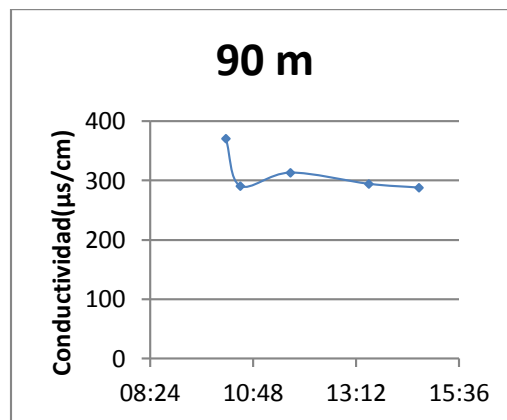
Adicional a esto se realizaron análisis de tiempo en los puntos citados, para determinar cuáles serán los 3 momentos del día en los que se realicen los muestreos, para esto se graficó para una misma abscisa la variación de los valores de conductividad en el tiempo, esto con el fin de poder determinar el momento en el cual se esperaba que el tránsito de la masa contaminante estuviera en sus valores máximos y mínimos locales de contaminación (Conductividad) que fueran representativos para las muestras.



Gráfica 15. Conductividad(µs/cm) vs tiempo en x=-10m (izq.) y x=0 m (der.)



Gráfica 16. Conductividad (µs/cm) vs tiempo en x=10m (izq.) y x=60m (der.)



Gráfica 17. Conductividad vs tiempo en x=90m

Basados en la Gráfica 15,16 y 17, se logra ver que alrededor de las 10:30 de la mañana existe una inflexión definida, por lo que se decidió tomar esta hora para empezar la campaña de muestreo, se observa también que desde el medio día la condición aguas arriba del vertimiento existe otro punto importante donde

empieza a subir los valores de conductividad, por lo que pasado el mediodía, 12.30 pm, se opta por hacer el segundo muestreo puntual.

Por último como fue mencionado anteriormente la conductividad está en sus puntos más altos en las horas de la tarde, fue por esto que a las 3.00 pm se definió hacer la última sub-campaña de muestras.

4.3.4 Cuarta Campaña

Campaña de muestreo. Determinados los puntos de muestreo y las horas a las que se debían tomar dichas muestras, se empezó la campaña, encontrando que a diferencia de las anteriores, esta campaña contaba con clima húmedo y con días previos con condiciones de lluvias prolongadas e intensas por lo que se encontró una lámina de agua mayor en casi 1 metro a la condición encontrada en campañas anteriores.

Esto cambió las condiciones en la visibilidad de la pluma, reduciéndola. Por lo que se realizó una campaña de conductividades para evaluar la condición del terreno con dichas características. Los nombres de las campañas se muestran en la tabla 4. Las campañas nombradas como *Sub 1* y *Sub 2*, son campañas que tienen parámetros de datos en los mismos puntos establecidos en la campaña 3 para ser consecuentes con el análisis que se había realizado, dado que la lámina de agua al subir, el proceso de mezcla se realizó de manera más rápida que al contar con una lámina propia de tiempos seco.

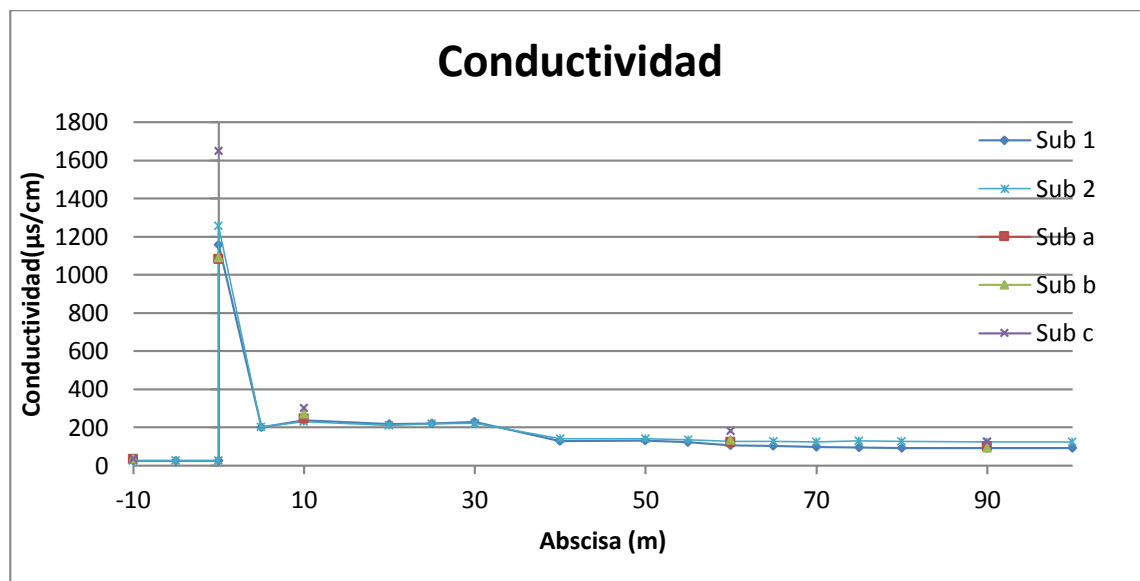
El resto de Sub Campañas (a, b y c) se hicieron esperando tener una conductividad aproximada a la obtenida en las anteriormente mencionadas, para así dar pie a la toma de muestras en los puntos escogidos según los análisis hechos en la campaña 3, como se presenta en las siguientes gráficas de parámetros de campo los valores de las campañas Sub a, Sub b y Sub c, estarán discontinuos, es decir sólo se mostraran puntos de los valores en las abscisas de muestreo ya que en los demás puntos por cuestiones de procedimiento en el muestreo no se alcanzaban a medir por lo cual sería un error unir los puntos y decir que ese fue su comportamiento.

Nombre Sub Campaña	Hora inicio
Sub 1	09:20:00 a.m.
Sub a	10:30:00 a.m.
Sub b	12:30:00 p.m.
Sub c	03:00:00 p.m.
Sub 2	03:50:00 p.m.

Tabla 5. Sub campañas. Cuarta Campaña

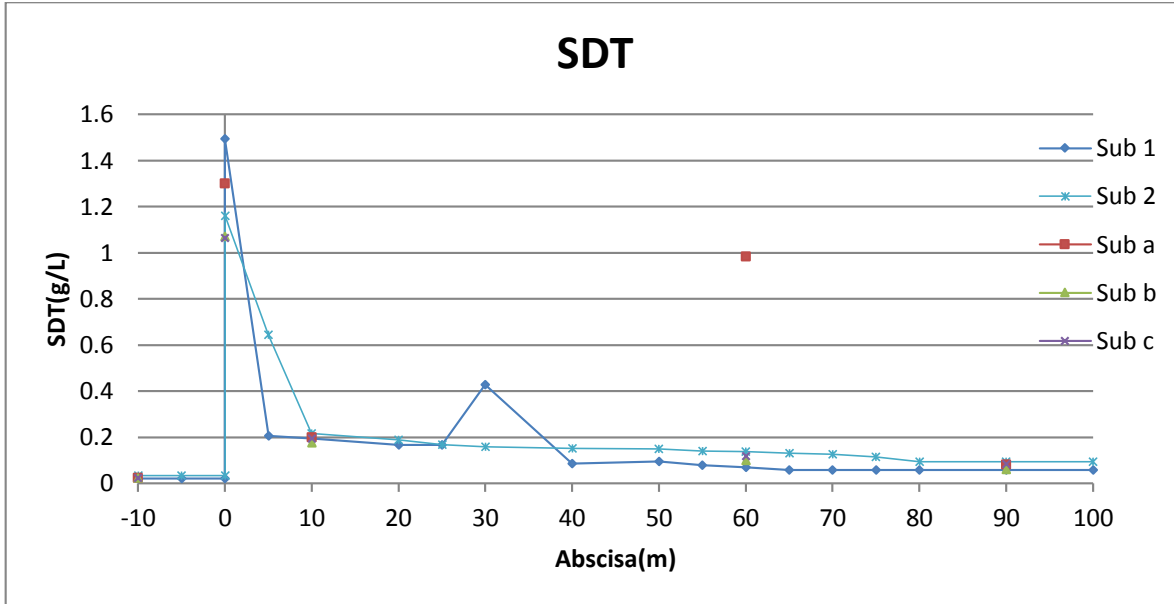
Como se muestra en la Gráfica 18, las conductividades aguas arriba del vertimiento, disminuyen su magnitud, respecto a las encontradas en las campañas anteriores (ver Gráfica 2, Gráfica 7 y Gráfica 11), esto debido a que al aumentar el caudal que transportaba el río y mantener la misma proporción de sólidos descargados por el efluente de lixiviados, hace que la concentración de dichos sea más baja que en las campañas anteriores (*Cervantes Nemer, 2009*), esto se refleja también en el comportamiento de los SDT, donde los valores encontrados en esta campaña (ver Gráfica 19) también descienden respecto a las anteriores campañas (ver Gráfica 3, Gráfica 8 y Gráfica 12).

Esto muestra como los parámetros siguen estando directamente relacionados, pues su comportamiento es similar, incluso enfrentados a una diferente condición hidrológica.



Gráfica 18. Conductividad. Cuarta Campaña

Aunque las condiciones hidrológicas cambiaron radicalmente, el punto final de estabilización en los parámetros de campo del río sigue siendo similar, dando un resultado parecido a los obtenidos anteriormente; se encontró que aproximadamente a los 100 metros aguas abajo del vertimiento, las magnitudes de los parámetros ya se encuentran estabilizados, cabe resaltar que aunque el comportamiento es similar las magnitudes o concentraciones de los parámetros como conductividad y SDT disminuyen dada la mayor capacidad de disolución del río por un mayor caudal en su curso (*Cervantes, 2009*).

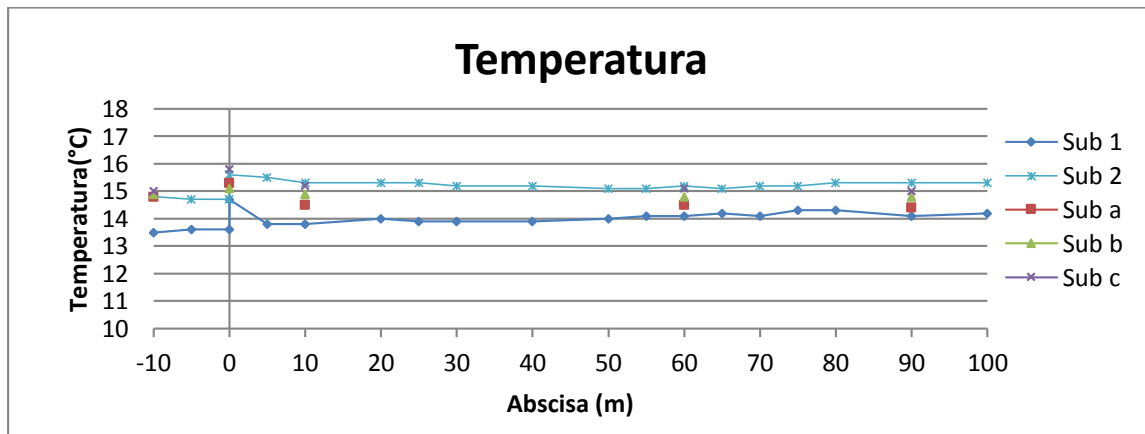


Gráfica 19. Sólidos disueltos totales. Cuarta campaña.

Con lo anterior se puede evidenciar, que a pesar del cambio en la hidrología, el comportamiento es similar en ambos escenarios, más no sus magnitudes, la conductividad reduce hasta 20 veces su magnitud, mientras que los SDT disminuyen casi 10 veces.

La mezcla del contaminante y el río, se da de manera más rápida y la distancia en la que transcurre dicha mezcla, es también menor. La temperatura en el punto de vertimiento, no muestra un incremento tan grande como el que se daba en las campañas anteriores (Ver Gráfica 20).

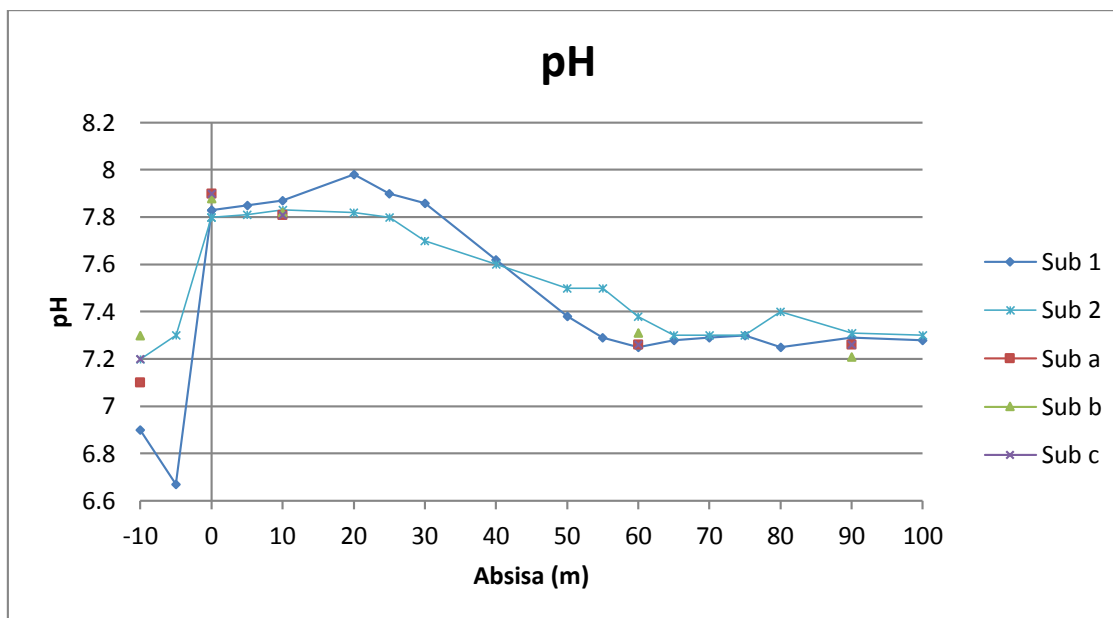
Posiblemente, debido al alto afluente del río que impide al lixiviado ser el dominante en el proceso de convección, por lo cual existe un incremento en la temperatura, pero no es significativo, al cabo de 5 a 10 metros, este cambio pasa desapercibido y se encuentra la misma temperatura aguas arriba.



Gráfica 20. Temperatura. Cuarta Campaña

El pH si muestra un comportamiento más marcado que las campañas anteriores, ahora el lixiviado al ser vertido incrementa el pH del río, luego tiende a estabilizarse en valores cercanos, aunque superiores a 7, correspondiendo a un pH básico.

Diferente a las campañas anteriores esta campaña mostro una condición aguas arriba de un pH ácido, con valores debajo de 7, ocasionalmente.



Gráfica 21. pH. Cuarta Campaña

4.4 Resumen de campañas de velocidades.

Las campañas de velocidades siguieron el procedimiento de realización como se mencionó en el 4.1.

Se pudo observar en campo que la lámina en tiempo seco no era muy alta y en ciertos lugares del río, se encontraron lugares donde se veía el fondo del canal, sobre todo en los lugares donde la velocidad era muy baja ya que se presentan procesos de sedimentación, y los sólidos que carga el río son retenidos en estos lugares. El panorama cambia en temporada de lluvias, ya que la lámina de agua incrementa su altura considerablemente y esto genera una re suspensión de los sólidos que carga el río.

En ambos casos climatológicos se asume que la velocidad obtenida por el flotador es la misma a lo largo de la sección, pues el método seleccionado no permite tener aforos en diferentes profundidades, y para efectos prácticos no se vuelve relevante conocer estos datos, por lo que se hace omisión de dicha distribución y se trabaja con las velocidades halladas en superficie.

Para la campaña del día 1 de Abril del 2013, se tomaron en total 10 mediciones con los flotadores, están compuestas por 6 mediciones en la parte lateral del río Tunjuelo y 4 mediciones en la parte central de éste.

Para la campaña del día 8 de Abril del 2013, se tomaron en total 18 mediciones con los flotadores, están compuestas por 10 mediciones en la parte lateral del río y 8 mediciones en la parte central de éste, el tránsito por el centro es más rápido que en la parte lateral, esto debido a que en la parte lateral el agua debido a la fricción que sufre contras las paredes del canal hace que ésta se mueva con más dificultad y por ende tenga menos velocidad (*Ven Te Chow, 1982*).

Para la campaña del día 15 de Abril del 2013, se tomaron en total 21 mediciones con los flotadores, las cuales están compuestas por 11 mediciones en la parte lateral del río y 10 mediciones en la parte central de éste, las velocidades promedio del río no tuvieron grandes variaciones respecto a la anterior campaña, ya que se encontraba en una condición de clima seco igual que en las anteriores campañas. Respecto a la variación entre la velocidad del centro y la lateral, ésta se debe a algunas barreras de sedimentos y objetos presentes en la campaña del 8 de abril que influían en los tiempos de los flotadores (mayor tiempo de viaje en la misma distancia), dichas barreras y objetos desaparecieron en la campaña del 15 de abril por eso el cambio en la velocidad del centro, la cual es más alta.

Para la campaña del 22 de Abril del 2013, se tomaron en total 30 mediciones con los flotadores, están compuestas por 16 mediciones en la parte lateral del río y 14 mediciones en la parte central de éste. Para esta campaña se tiene en cuenta que la temporada de invierno se hizo presente en los niveles del río, por lo cual las magnitudes en las velocidades promedio cambiaron.

Respecto a lo observado en campo se concluyó que el caudal presente en el río incremento y las velocidades que manejaba el río según las mediciones también incrementaron en una proporción aproximadamente casi del doble como se aprecia en los dos valores promedio de las velocidades en esta última campaña. Se realizaron finalmente 79 mediciones y los resultados obtenidos como lo son el promedio de las campañas tanto en el centro del río como en sus lados, las velocidades máximas y velocidades mínimas se pueden ver en la Tabla 6 (Todas las mediciones realizadas se muestran en anexos). Dichos resultados se utilizaran en el capítulo 6, para la determinación de los caudales pertinentes para el modelo de transito hidráulico.

	Velocidad promedio		Velocidad máxima V(m/s)	Velocidad mínima V(m/s)
	Lateral	Central		
	V(m/s)	V(m/s)		
Campaña 1 abril	0.353	0.510	0.529	0.334
Campaña 8 de Abril	0.356	0.506	0.570	0.301
Campaña 15 de Abril	0.351	0.635	0.671	0.313
Campaña 22 de Abril	0.835	1.195	1.364	0.777
Resumen de campañas	0.474	0.711	1.364	0.301

Tabla 6. Velocidades promedio del Río

De manera ilustrada se muestra la explicación de velocidad lateral y central (ver Ilustración 19).

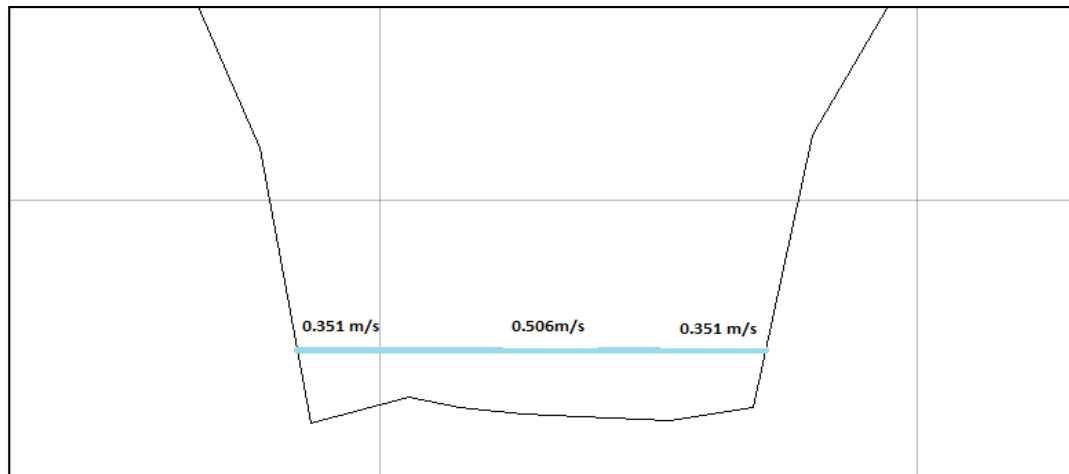


Ilustración 19. Distribución de velocidades en sección transversal para segunda campaña (8 de abril)

5. DETERMINACIÓN DE CAMBIOS EN LAS CONCENTRACIONES DE PARÁMETROS DE CALIDAD.

Dadas las condiciones del terreno, conocidas por la información proporcionada por la EAAB (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2009), se realizan los cálculos de la longitud de mezcla entre el río y el lixiviado siguiendo la ecuación 3, propuesta por *Fischer (1979)*. Comenzando por las tres primeras campañas que tuvieron clima seco y por ende una lámina superficial menor, se tiene entonces que la longitud teórica de mezcla es de 45.53 metros, una vez obtenidos los parámetros de:

H(m)	0.93
s (%)	0.02%
B(m)	7.97
u(m/s)	0.04
E lat.	0.02

Tabla 7. Valores para cálculo de Longitud de mezcla en temporada seca

Para el caso de lluvias, se cuenta con una lámina de agua H, mayor, por lo que la longitud de mezcla se ve afectada y da un resultado de 41.63 m, resultado que teóricamente disminuye 3.91 metros, un valor relativamente pequeño para lo que se pensaba que iba a disminuir teniendo en cuenta las condiciones presentadas y mencionadas en el inciso 4.3.4 donde la visibilidad de la pluma disminuía y el caudal transportado era mayor.

H(m)	1.19
s (%)	0.02%
B(m)	8.62
u(m/s)	0.04
E lat.	0.03

Tabla 8. Valores para cálculo de Longitud de mezcla en temporada de lluvia

Ambas longitudes se aproximan mucho al resultado encontrado en campo en donde aproximadamente el valor observado de esta longitud de mezcla es de 50 metros, teniendo en cuenta el comportamiento de los parámetros medidos en campo y que son reflejados en las gráficas mostradas en el sección 4.3, con esto se confirmaría la hipótesis planteada de encontrar un punto que defina el límite donde se termina la zona de mezcla y empieza la zona de estabilización, tal como se presenta en las gráficas de parámetros de Conductividad y SDT. Estos resultados obtenidos permiten concluir que los datos tomados en sitio se asemejan a los cálculos teóricos.

Finalizando las campañas que permitieron conocer el comportamiento del río frente al lixiviado en cuanto a parámetros de campo y su tránsito de viaje, se prosiguió con el siguiente aspecto relevante que es conocer el comportamiento de éste en cuanto

a la calidad de agua. Para esto se midieron parámetros generales de laboratorio que permiten dar un indicativo de la calidad de agua, entre ellos la Conductividad (Gráfica 22), pH (Gráfica 23), Sólidos Suspendidos Totales SST (Gráfica 24), Sólidos suspendidos volátiles SSV (Gráfica 25), Nitrógeno total orgánico (Gráfica 26), Demanda Química de oxígeno DQO (Gráfica 27) y Demanda Biológica de Oxígeno DBO₅ (Gráfica 28) que son parámetros recomendados por el *Título E: Tratamiento de Aguas Residuales del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*.

Para realizar la caracterización del comportamiento de la calidad de agua, se establecieron 5 puntos específicos (determinados en el Sección 4.3) en los cuales se tomaron muestras puntuales a 3 diferentes horas (10:30 a.m., 12:30 p.m. y 3:00 p.m.), que posteriormente se llevaron al laboratorio de calidad de agua de la Pontificia Universidad Javeriana en donde se le practicaron los ensayos correspondientes para la evaluación de los parámetros antes mencionados.

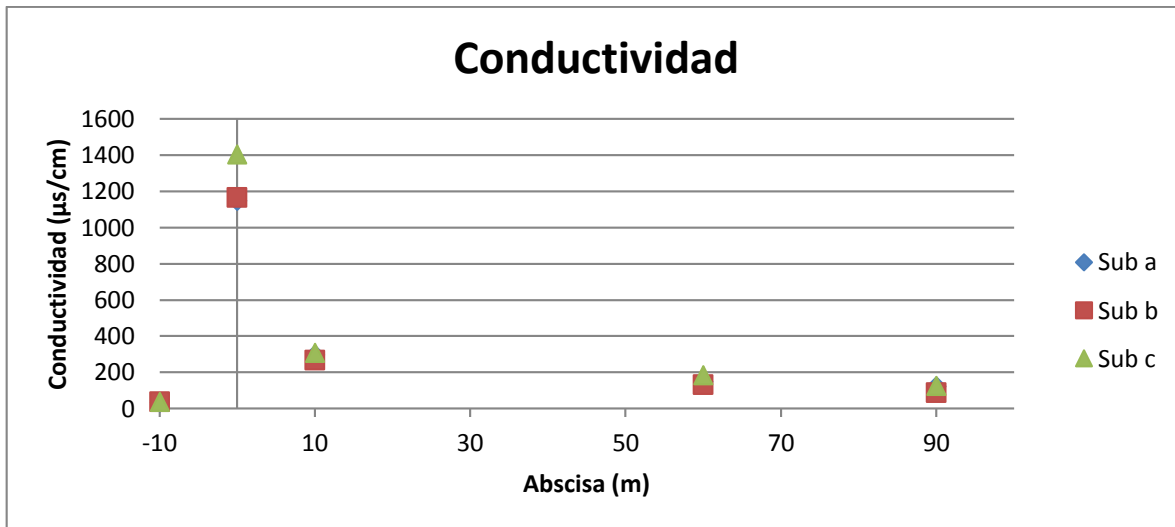
El siguiente es un esquema en donde se establecen los puntos de muestreo



Ilustración 20. Localización muestreo puntual

En las Gráficas 22 a la 28, mostradas a continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Las sub campañas son las mismas mencionadas en la Tabla 5.

Conductividad



Gráfica 22. Conductividad en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio.

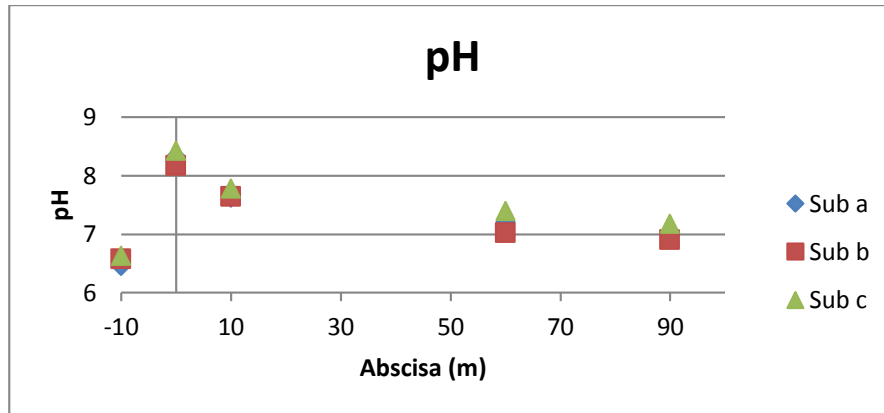
El comportamiento de la conductividad obtenida por el laboratorio es como la esperada y vista en las campañas de parámetros de campo realizadas, donde se observa un incremento en la magnitud en el punto del vertimiento, lo cual está confirmando la presencia de gran cantidad de sólidos disueltos o impurezas en el efluente de vertimiento (*Jiménez Cisneros, 2005*), respecto a las magnitudes de los resultados obtenidos en el laboratorio se observa que estos son aproximados a los que se midieron en la campaña en campo, lo que confirma que hay confiabilidad en los datos tomados en campo.

Seguido del punto del vertimiento se confirma que el proceso de mezcla es menor a medida que aumenta el caudal debido a la disolución y difusión dentro del cuerpo de agua. (*Cervantes Nemer, 2009*), como se dijo en la cuarta campaña, ésta fue realizada durante época de lluvias (aumento el caudal del río), lo que generó que el cuerpo de agua tuviera una menor conductividad, como se puede apreciar en los valores mostrados en la Gráfica 22 se obtienen valores antes del vertimiento entre los 31.5 y los 36.6 $\mu\text{s/cm}$, en el punto de la descarga aumenta hasta el rango entre 1147 a 1403 $\mu\text{s/cm}$ y posteriormente desciende hasta encontrar magnitudes en un rango que alcanza a superar el doble de las encontradas aguas arriba, estos valores demuestran que con un caudal alto como lo fue el encontrado en la cuarta campaña, hace que el impacto sea mucho más bajo, visto desde los valores obtenidos.

pH

Los resultados del pH son semejantes a los datos tomados in situ en la cuarta campaña, donde estos también toman valores básicos en el vertimiento y aguas abajo, confirmando que existe una mayor presencia de iones de hidrógeno que de iones de hidróxido en esta zona (*Starr y Taggart, 2008*). Aguas arriba se observa un caso en donde el pH viene ácido, lo cual permitiría concluir que el efecto del

vertimiento sobre el río en una situación de temporada de lluvia es que tiene sustancias que le brindan iones de hidrógeno al río que alteran el pH a un cambio de pH ácido a pH alcalino. Las magnitudes tienen el mismo comportamiento de ascenso en el vertimiento y descenso de ahí en adelante.

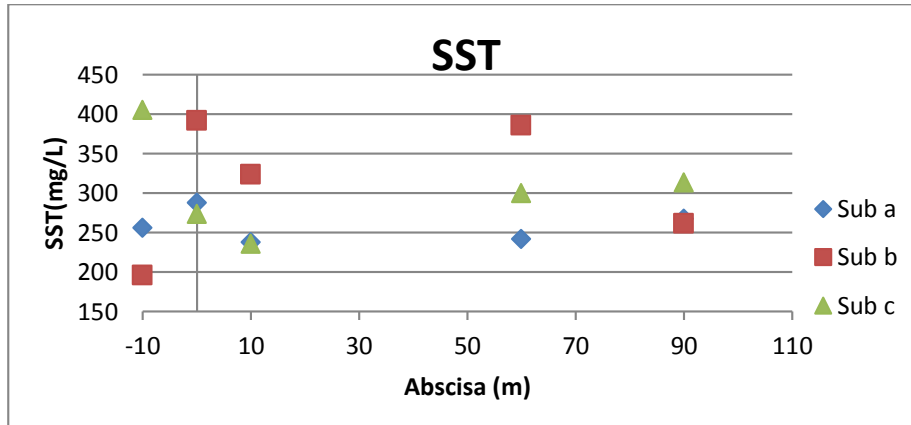


Gráfica 23. pH en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio.

Sólidos Suspendidos Totales

Los resultados del laboratorio de Sólidos Suspendidos Totales muestran en el punto del vertimiento que la concentración tiende a subir a valores entre 250 y 400 mg/L, exceptuando la Sub campaña c, en donde luego de ver la tendencia del comportamiento de los datos se puede concluir que el valor del dato aguas arriba del vertimiento está muy alejado de los valores esperados convirtiéndolo en un dato anormal, por lo cual se toma la decisión de descartarlo y no tenerlo en cuenta para el análisis. En la situación después del vertimiento, se sigue encontrando un comportamiento igual al obtenido en los demás parámetros en donde aquí los SST tienden a y llegan a estabilizarse al final del tramo de estudio con valores cercanos a los 250 y 300 mg/L que son ligeramente superiores a los que tenía condiciones aguas arriba.

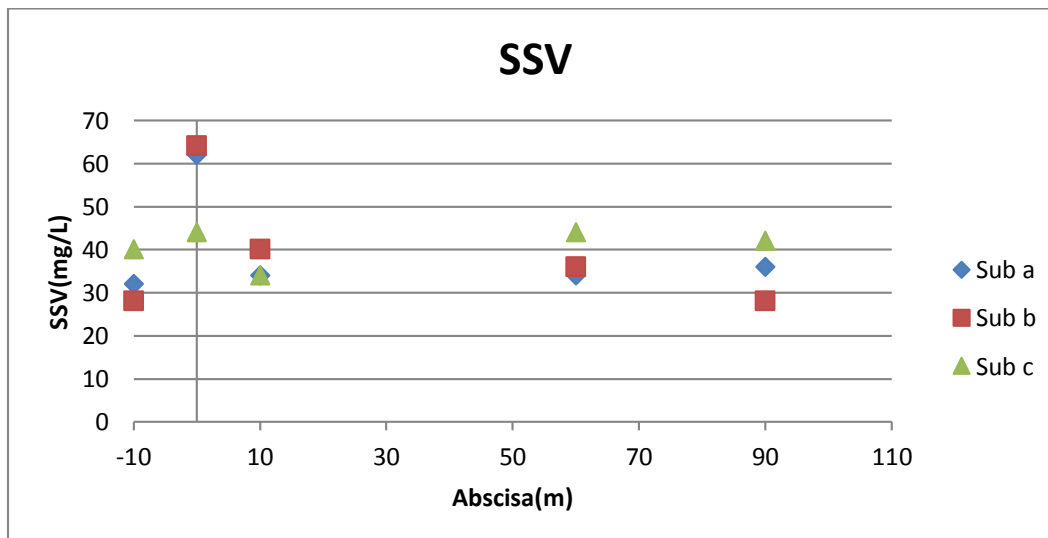
Dichos valores según la resolución 3956 de 2009 en la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital y que refiere al el Acuerdo CAR 43 de 2006, para agua con uso clase IV "Uso agrícola con restricciones y pecuario" clase por la cual está regida este sector del río, se encuentra que estos sobrepasan el límite establecido en donde el máximo valor de sólidos suspendidos es de 40 mg/L.



Gráfica 24. SST en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio

Sólidos Suspendedos Volátiles

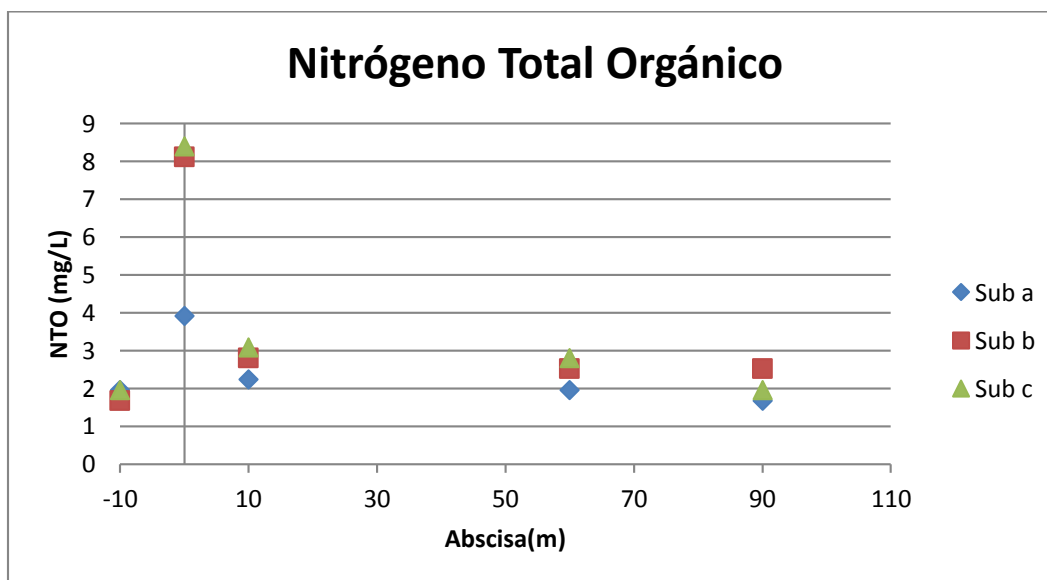
Los resultados de los Sólidos Suspendedos Volátiles mostraron un comportamiento como el esperado en donde en el punto de vertimiento, los niveles de este parámetro deberían aumentar, y que a lo largo de la zona de estudio luego de ser transportadas y distribuidas en el río por procesos naturales, como la difusión, que hacen que se muevan de zonas de mayor concentración a menor (*Chapra, 2008*) estos niveles se reduzcan, hasta alcanzar magnitudes un poco mayores a las encontradas aguas arriba del vertimiento, el pico en la gráfica vuelve a encontrarse como en los anteriores parámetros evaluados en la abscisa cero donde alcanza a valores de 60 (mg/L) y finalizando el proceso de mezcla llega a valores cercanos a los 40mg/L relativamente superiores a los encontrados aguas arriba del vertimiento.



Gráfica 25. SSV en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio

Nitrógeno total orgánico

El nitrógeno total orgánico como es de esperarse también se ve afectado por la premisa de cambio de condiciones respecto a la hora del día en el que se haga la sub campaña, y se observa de nuevo que su comportamiento es similar al de los demás parámetros explicados hasta el momento, en el vertimiento se incrementa la cantidad de nitrógeno total orgánico a valores cercanos a los 8 mg/L, lo que puede hacer que las bacterias presentes en el agua utilicen estas sustancias con nitrógeno como nutriente para ellas y por lo tanto, realicen diferentes procesos biológicos. Entre los procesos biológicos se obtiene nitrato, y al producirse éste, se agota el oxígeno presente en el agua disminuyendo las posibilidades de encontrar vida acuática (Sánchez, 2007). Posteriormente desciende hasta encontrar la estabilización en los 90 m con valores entre 2 y 3 mg/L, obteniendo el mismo patrón de parámetros anteriores, donde dicha estabilización alcanza niveles similares, pero superiores a los de aguas arriba. Este parámetro dispersa muy poco sus valores, exceptuando el punto del vertimiento.



Gráfica 26. Nitrógeno total orgánico en muestras puntuales

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

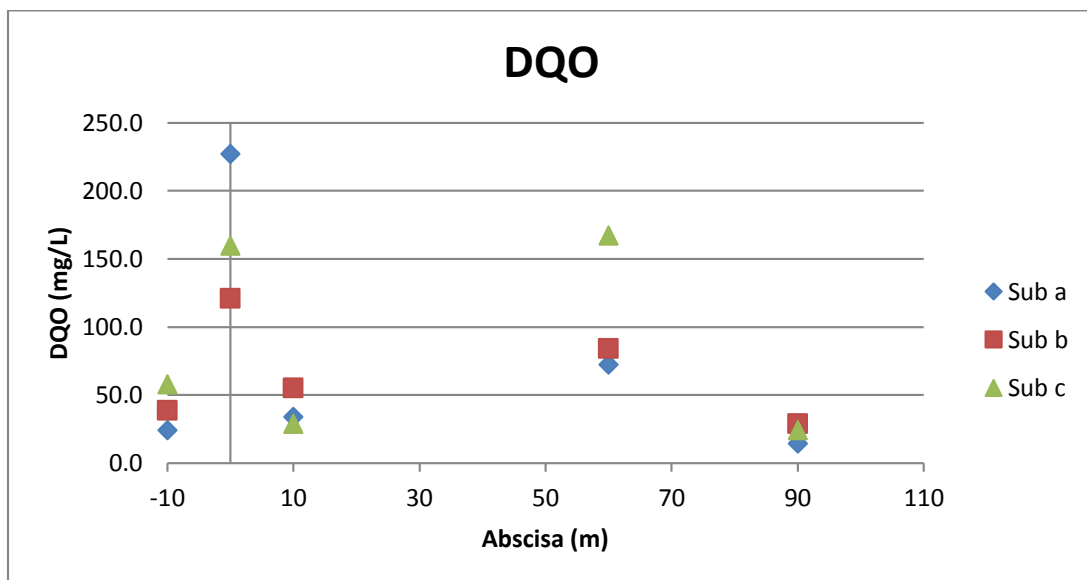
Los resultados del parámetro DQO permiten concluir de una manera indirecta la cantidad de materia orgánica oxidable químicamente presente en el río y determina la cantidad de oxígeno que requiere el cuerpo de agua para que éste pueda descomponer dicha materia, es por eso que entre mayor sea este valor indica que hay presencia de gran cantidad de materia orgánica y por lo tanto que dicha agua está contaminada (Sánchez, 2007).

Este parámetro como es de esperarse debería subir en el punto de vertimiento del lixiviado ya que éste contiene una gran cantidad de materia orgánica, que al

momento de entrar al río, éste busca realizar un proceso de autodepuración que consiste en el proceso natural químico y biológico que tiene la corriente para poder asimilar o recuperarse luego de un descarga contaminante (Marín Galvín, 2003).

En la Gráfica 27 se puede observar el comportamiento mencionado anteriormente en donde en el punto del vertimiento los valores de DQO aumentan a valores por encima de 100 mg/L lo que quiere decir que el agua en este punto es catalogada desde el parámetro de DQO como agua fuertemente contaminada, pero que a medida que se da el proceso de difusión y asimilación de la carga contaminante por parte del río llega a tener al final del tramo de estudio valores de en un rango aproximado de 20 a 30 mg/L que convierte al agua en un agua relativamente aceptable pero contaminada (Sánchez, 2007), un aspecto que cabe resaltar es que aquí los valores al final y aguas arriba del vertimiento son valores relativamente cercanos y a condición contraria de los demás parámetros alcanza a haber una disminución de este parámetro al final con respecto al principio, lo que nos podría decir que el río es capaz de asimilar la carga de DQO vertida por el relleno.

La dispersión de un dato es grande en los 60m, donde éste se encuentra fuera de la tendencia, por lo que su comportamiento se omite en el estudio, por posibles errores durante la toma de la muestra.



Gráfica 27. DQO en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

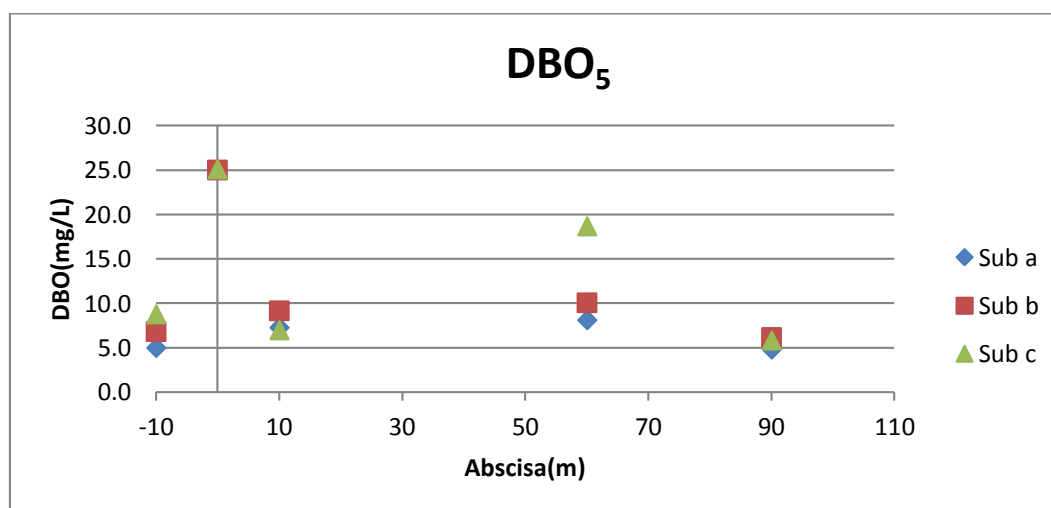
Los resultados del parámetro DBO₅ nos permiten concluir de manera indirecta, y similar que con la DQO, la cantidad de materia orgánica biodegradable que puede poseer el cuerpo de agua, pero que a diferencia de la DQO, esta materia es degradada por microorganismos, es decir por procesos biológicos, los resultados de este parámetro nos indican la cantidad de oxígeno necesario que requieren dichos

microorganismos para poder realizar los procesos biológicos que permitan degradar la materia y así disminuir los niveles de contaminación en el cuerpo de agua (Sánchez, 2007).

Los niveles de este parámetro se ven alterados de la siguiente manera, entre más alto sea el nivel de la DBO_5 quiere decir que se necesita una gran cantidad de oxígeno para que los microorganismos puedan actuar (el oxígeno disuelto en el río es bajo) y por lo tanto se puede decir que hay una presencia de materia relativamente grande, es por eso que en el punto de vertimiento este valor debe incrementar ya que el río está recibiendo una carga de materia orgánica e inorgánica proveniente del lixiviado vertido por el relleno sanitario, y a medida que nos alejamos del punto aguas abajo este parámetro debería disminuir debido a la difusión y degradación de esta materia.

En la Gráfica 28, el comportamiento dado por los resultados del laboratorio es como el que se esperaba, se puede ver que en el vertimiento los valores de DBO_5 se incrementan a valores cercanos a los 25 mg/L que califican el agua desde este parámetro como aceptable pero contaminada (Sánchez, 2007) y que los niveles de oxígeno disuelto son bajos, seguido de este punto los valores del parámetro van disminuyendo secuencialmente hasta el tramo final donde los valores de DBO_5 llegan a valores similares a los iniciales aguas arriba del vertimiento, que son valores dentro del rango de 5 a 6 mg/L.

Finalmente comparando estos valores obtenidos en el laboratorio con la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, para agua con uso clase IV que es "Uso agrícola con restricciones y pecuario" que es la clase en la cual se clasificó al río en este sector del relleno sanitario Doña Juana (Pontificia Universidad Javeriana, 2010), se tiene en el acuerdo que los niveles máximo de calidad en DBO_5 es de 50 mg/L, por lo que se diría que se está cumpliendo este requisito.



Gráfica 28. DBO_5 en muestras puntuales a lo largo de la zona de estudio

La diferencia obtenida entre los datos de cada uno de los puntos de muestreo es pequeña, excepto en los 60 metros donde se encuentra en la última campaña tanto en la DBO₅, DQO y SST valores que no se ajustan a las demás campañas y a los comportamientos que se aspiran encontrar, por lo que dichos valores en esa última sub-campaña se omiten pues pueden presentarse debido a errores humanos.

El análisis anteriormente realizado se hizo con el fin de obtener los datos más acertados para alimentar el modelo de calidad Qual2k y poder comparar lo obtenido en el modelo con los resultados reales de las pruebas del laboratorio. Allí se harán las respectivas simulaciones de los escenarios de tiempo seco, medio y lluvioso (variación del caudal del río), y los resultados que brinde el programa serán utilizados para hacer comparaciones con los resultados que dieron en las campañas de campo en temas como el comportamiento y valores de los parámetros, y así finalmente concluir si el modelo alcanza a representar lo que sucede en campo, es decir la realidad del río.

6. MODELO DE TRÁNSITO HIDRÁULICO EN HEC-RAS PARA LA SECCIÓN DE ESTUDIO DEL RIO TUNJUELO

6.1 Montaje del modelo.

El montaje del modelo de tránsito del río Tunjuelo se realizó en el programa Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS), diseñado para modelar el comportamiento hidráulico que tiene un río, a partir de una serie de parámetros iniciales que ingresa el usuario. El modelo genera como resultado una serie de gráficos y reportes de tablas que se encargan de mostrar los resultados obtenidos de diferentes análisis de componentes hidráulicos.

Los datos o parámetros iniciales requeridos por el modelo HEC-RAS para que tenga un buen funcionamiento, son primero los datos geométricos de la sección del canal del río (Batimetría), tener definidas las respectivas estructuras hidráulicas que éste posea, si es que están presentes en el río y su geometría correspondiente, tener definida la ubicación del canal principal por donde transita el río, los respectivos coeficientes de rugosidad de Manning del canal y por último el valor o valores del caudal del río que se requieran modelar (*Manual Hec-Ras*).

Para el desarrollo del modelo del Río Tunjuelo, se contó con información de:

- Batimetría y de coeficientes de rugosidad de la zona de estudio del río equivalente a 124 metros del río, provenientes de la EAAB. (*Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2009*)

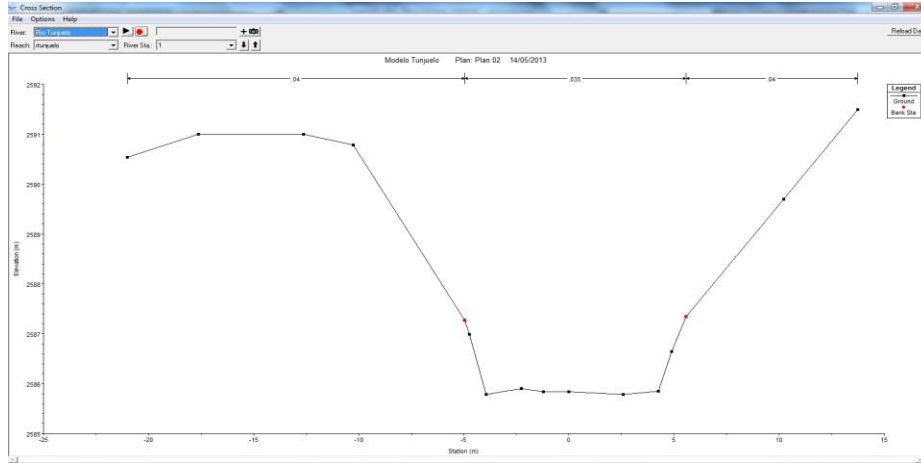
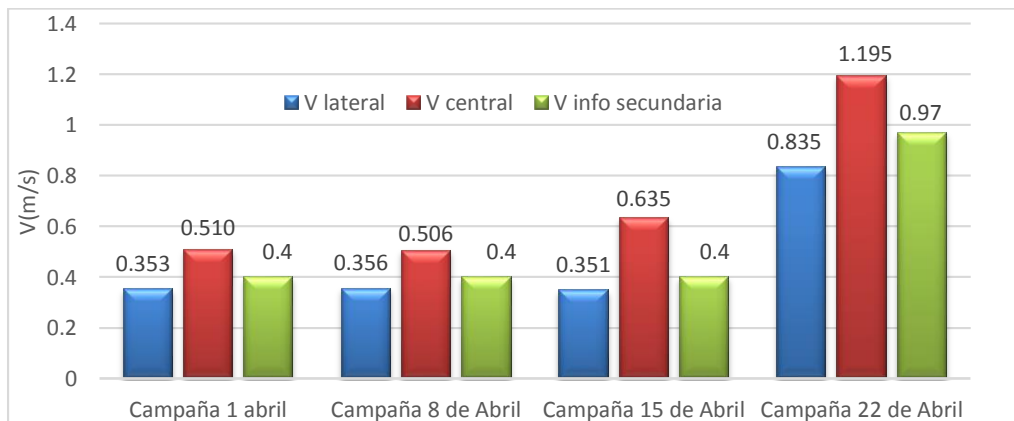


Ilustración 21. Sección transversal de la abscisa 0 del río.

- Estudios de registros históricos mensuales multianuales de caudales del río Tunjuelo desarrollados en el POMCA, estudios realizados por la EAAB (*Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2009*) y la Pontificia Universidad Javeriana (*Pontificia Universidad Javeriana, 2010*), por ultimo campañas de aforos in situ realizadas los días 1, 8, 15 y 22 de Abril del 2013, con dicha información se definieron los valores de caudal mínimo, medio y máximo que se ingresaron en el modelo de tránsito.

Para tomar dicha decisión se realizó una comparación entre los datos obtenidos por las campañas de medición y los datos obtenidos por la información secundaria, de esta manera se verificaba la información lo que permitía obtener conclusiones de la correcta utilización de éstas dentro del modelo.

Para la comparación de la información se realizó una gráfica que describe las velocidades obtenidas en las campañas de medición (Todas las mediciones realizadas se muestran en anexos) y las velocidades obtenidas en la información secundaria:



Gráfica 29. Comparación velocidades obtenidas con información secundaria

Las barras verdes muestran los resultados obtenidos con los caudales mínimos mensuales multianuales para las 3 primeras campañas (1, 8, 15 de Abril) y los máximos mensuales multianuales en el caso de la última campaña (22 de Abril), este cambio con el fin de ser consecuente con el clima encontrado en los días de medición.

Como se puede ver en la gráfica, no existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos en los aforos y la información secundaria que corresponde a registros históricos, ya que se encuentra que el promedio de la velocidad en el río determinado por la velocidad lateral y central es similar a la velocidad del río dada por los registros históricos (Barras Verdes en la gráfica), es por eso que se decidió trabajar con la información secundaria ya que ésta refleja lo obtenido en campo y tiene mayor peso al ser información obtenida de análisis históricos.

Finalmente los valores de caudales que se definieron para ingresar al modelo de tránsito teniendo en cuenta lo dicho anteriormente son:

Registros históricos de Caudales(m ³ /s)		
Qmin	Qmedio	Qmax
0.31	2.76	6.73

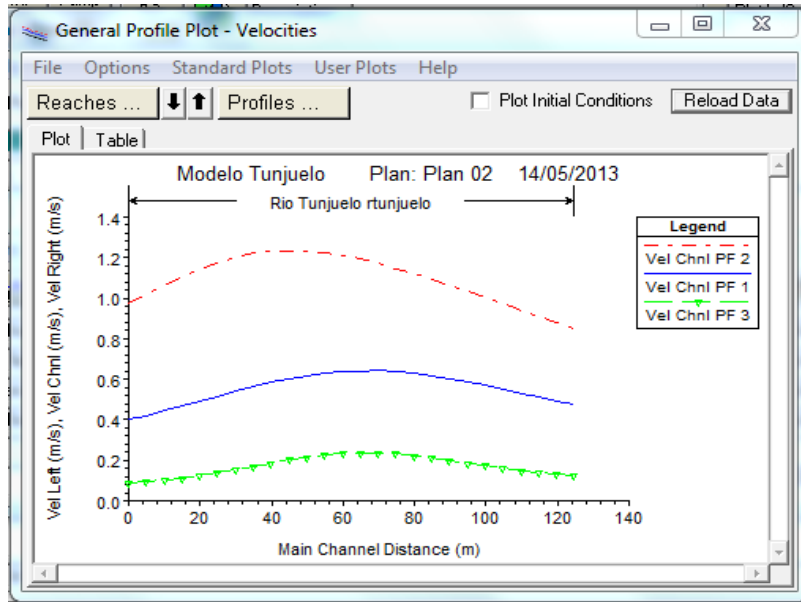
Tabla 9. Caudales medios multianuales históricos

Posteriormente con los datos previamente mencionados e ingresados en el programa se realizó la simulación del modelo.

6.2 Simulación y resultados.

La simulación del modelo con los datos establecidos (PF1= Qmedio, PF2= Q máx. y PF3= Q mín.) representó un comportamiento hidráulico aceptable de acuerdo con las condiciones reflejadas en campo a lo largo del tramo de estudio.

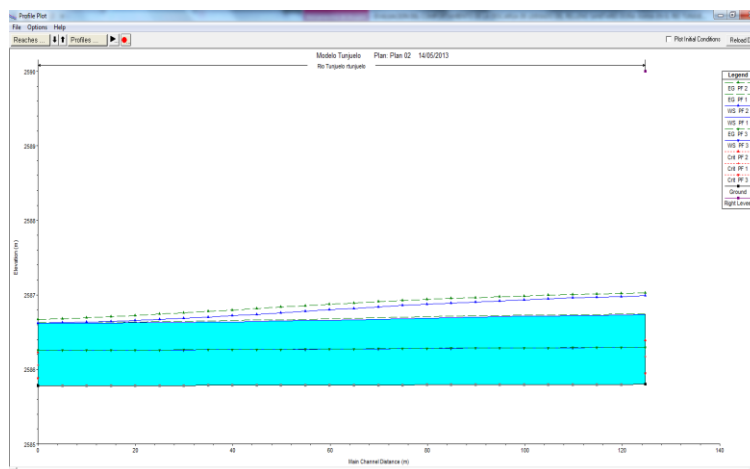
Entre ellas cabe mencionar las velocidades presentes en el río, que son muy semejantes a las obtenidas en las campañas de aforo realizadas los días 1, 8, 15 y 22 de Abril.



Gráfica 30. Resultados de las velocidades obtenidas en Hec-Ras

Se puede observar que la velocidad en el modelo oscila en un rango de 0.4 a 0.6 m/s para una condición promedio de caudal del río en donde la velocidad calculada por los aforos realizados para esta situación se encuentra dentro del rango, de igual manera se encuentra que la velocidad calculada para la situación de lluvia que se presentó el día 22 de abril (donde el río incremento en gran proporción su caudal) también se encuentra dentro del rango de velocidades del modelo para una condición de caudal máximo.

Otros aspectos revisados fueron los niveles del río generado en el modelo que se presentan a continuación (Gráfica 31)



Gráfica 31. Niveles de la lámina de agua obtenida en Hec-Ras

Los cuales fueron aproximados a los observados en campo en dónde para condiciones normales en campo se tenían láminas entre 0.89 y 0.96 metros, y

para condiciones de lluvia niveles de 1.15 a 1.20 metros, lo que finalmente permite concluir la aceptación del modelo ya que refleja las condiciones reales presentadas en el río con gran aproximación para las dos condiciones de caudales presentados en campo como se muestra en la siguiente tabla.

Q (m ³ /s)	Resultados del modelo		Resultados en campo	
	V(m/s)	Altura de lámina de agua (m)	V(m/s)	Altura de lámina de agua (m)
2.76	0.4 - 0.6	0.93	0.55	0.89 - 0.96
6.73	0.9 - 1.2	1.19	1	1.15 - 1.2
0.31	0.1 - 0.2	0.49	-	-

Tabla 10. Comparación de resultados obtenidos en Hec-Ras y en campo.

El modelo se realizó con el fin de conocer las características y propiedades hidráulicas que poseía el tramo de estudio, ya que estos son parámetros de vital importancia a la hora de alimentar el modelo de calidad de agua en Qual 2k para que éste funcione correctamente a la hora de realizar la simulación de calidad, dichos parámetros se hablan en la sección 7.1 (los resultados más detallados se encuentran en anexos).

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
rtunjuelo	50	PF 1	2.76	2585.80	2586.73	0.47	5.83	7.97	0.18
rtunjuelo	50	PF 2	6.73	2585.80	2586.99	0.85	7.94	8.62	0.28
rtunjuelo	50	PF 3	0.31	2585.80	2586.29	0.12	2.56	6.96	0.06
rtunjuelo	48.04*	PF 1	2.76	2585.80	2586.73	0.49	5.60	7.93	0.19
rtunjuelo	48.04*	PF 2	6.73	2585.80	2586.98	0.88	7.66	8.62	0.30
rtunjuelo	48.04*	PF 3	0.31	2585.80	2586.29	0.13	2.39	6.85	0.07
rtunjuelo	46.06*	PF 1	2.76	2585.80	2586.73	0.51	5.39	7.91	0.20
rtunjuelo	46.06*	PF 2	6.73	2585.80	2586.97	0.91	7.40	8.63	0.31
rtunjuelo	46.06*	PF 3	0.31	2585.80	2586.29	0.14	2.23	6.74	0.08
rtunjuelo	44.12*	PF 1	2.76	2585.80	2586.72	0.53	5.19	7.90	0.21
rtunjuelo	44.12*	PF 2	6.73	2585.80	2586.96	0.94	7.15	8.66	0.33
rtunjuelo	44.12*	PF 3	0.31	2585.80	2586.29	0.15	2.07	6.65	0.09
rtunjuelo	42.16*	PF 1	2.76	2585.80	2586.72	0.55	5.00	7.91	0.22
rtunjuelo	42.16*	PF 2	6.73	2585.80	2586.95	0.97	6.92	8.71	0.35
rtunjuelo	42.16*	PF 3	0.31	2585.80	2586.29	0.16	1.93	6.56	0.09

Tabla 11. Resultados de Parámetros Calculados por Hec-Ras

7. MODELO DE CALIDAD DE AGUA EN QUAL2K PARA LA EVALUACIÓN DEL RIO TUNJUELO.

7.1 Montaje del modelo.

Para el montaje del modelo de calidad del río Tunjuelo se utilizó el programa Qual 2k, que es un programa matemático realizado por medio de códigos en Visual Basic de la herramienta Excel y Fortran (Manual de usuario de Qual2k) (Ver Ilustración 22), diseñado para modelar el comportamiento de la calidad de una corriente de agua tomada como un cuerpo receptor, que es sometida a diferentes descargas contaminantes o parámetros iniciales que ingresa y describe el usuario.

QUAL2Kw (version 5.1)		
Stream Water Quality Model		
<i>Greg Pelletier, Steve Chapra, and Hua Tao</i>		
<i>Department of Ecology and Tufts University</i>		
<input type="button" value="Open File"/> <input type="button" value="Run VBA"/> <input type="button" value="Run Fortran"/>		
System ID:		
River name	Rio Tunjuelo	
Saved file name	BC_1987-08-21	
Directory where the input/output files are saved	A:\Documents\Tesis\Tesis Verdadera\Qual	
Month	5	
Day	16	
Year	2013	
Local standard time zone relative to UTC	-5	hours
Daylight savings time	Yes	
Simulation and output options:		
Calculation step	0.021972656	minutes
Number of days	2	days
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Newton-Raphson	
Simulate hyporheic exchange and pore water quality	No	
Display dynamic diel output	No	
State variables for simulation	All	
Simulate sediment diagenesis	Option 1	
Simulate alkalinity change due to nutrient change	Yes	
Write dynamic output of water quality	No	
Program determined calc step	0.021972656	minutes
Time elapsed during last model run	1.00	minutes
Time of sunrise	1:52 AM	
Time of solar noon	7:56 AM	
Time of sunset	1:59 PM	
Photoperiod	12.12	hours

Ilustración 22. Datos iniciales de alimentación del modelo de calidad de agua

El lenguaje conocido como Fortran realiza procedimientos matemáticos y calcula las variables correspondientes, dando como resultado final una serie de hojas de Excel que muestran los valores calculados por el programa de diferentes parámetros de calidad analizados, y posteriormente una serie de gráficas que permiten ver los resultados más claramente.

El procedimiento inicial para realizar el montaje del modelo del río en Qual2k, es tener establecido el tramo de estudio de la corriente, conociendo su distancia total y principales estaciones como las más aguas arriba y las más aguas abajo así como sus respectivas características hidráulicas y de calidad.

Para este modelo se tomaron 6 puntos que definieron el tramo de estudio, los primeros 5 puntos son los mismos que se establecieron en las campañas de muestreo que son Headwater equivalente al punto aguas arriba del vertimiento, primer punto equivalente a la zona de vertimiento, segundo punto equivalente a 10 metros aguas abajo, tercer punto equivalente a 60 metros aguas abajo con respecto al vertimiento, el cuarto punto equivalente a 90 metros aguas abajo del vertimiento, y el 6 punto se refiere a la abscisa de 100 metros donde terminaba el tramo de estudio en los análisis de campañas (Tabla 12)

<i>Reach</i>	<i>Downstream</i>	<i>Reach</i>	<i>Reach</i>	<i>Downstream</i>		<i>Downstream</i>
<i>Label</i>	<i>end of reach label</i>	<i>Number</i>	<i>length (km)</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>location (km)</i>
	Headwater	0		0.00	0.00	0.150
primer punto	pp	1	0.05	0.00	0.00	0.100
segundo punto	sp	2	0.01	0.00	0.00	0.090
tercer punto	tp	3	0.06	0.00	0.00	0.030
cuarto punto	cp	4	0.02	0.00	0.00	0.010
	final	5	0.01	0.00	0.00	0.000

Tabla 12. Puntos distribuidos a lo largo del tramo de estudio

Posteriormente se ingresan los valores de condiciones iniciales en Headwater. Esto se refiere a los resultados del laboratorio mostrado en el Capítulo 5 y anexos, se ingresan los valores de los parámetros de calidad en el modelo para así realizar su alimentación, entre ellos se encuentran conductividad, temperatura, SST, DBO₅, DQO y pH, el caudal ingresado es el establecido para cada caso hidrológico, según los resultados obtenidos en el modelo hidráulico, explicados en la sección 6.2.

Seguido de ingresar valores de calidad, se alimenta el modelo con características hidráulicas, que son tomadas del modelo de tránsito hidráulico realizado en HEC-RAS mostrado en el capítulo 6, entre ellas se encuentra el ancho superficial, pendientes del canal, coeficientes de Manning a lo largo del tramo de estudio, y finalmente el caudal del río.

Por último se ingresan las características de algún vertimiento o retiro de caudal en el río. Para este caso sólo se tiene un punto de vertimiento, que es el realizado por el relleno sanitario Doña Juana, en donde realiza la descarga de lixiviados. Para esto se ingresó el caudal del vertimiento suministrado por la planta y registrado en campo, el caudal vertido es de 42 m³/h es decir 0.0117 m³/s. Los parámetros de calidad con los que sale el vertimiento, se ingresaron también y son provenientes de los ensayos de laboratorio realizados, capítulo 5, para la abscisa 0, equivalente a la zona de vertimiento.

Finalmente con los datos previamente mencionados e ingresados en el programa se realizó la simulación del modelo variando el parámetro de caudal del río que es el que refleja los escenarios de lluvia, seco y medio, estos valores de caudal son los mismos que se ingresaron en el modelo de HEC RAS (Ver Tabla 9) y posteriormente se realizó una simulación para los mismos escenarios

de lluvia, seco y medio para una condición de vertimiento donde el lixiviado no ha sido tratado por la planta de tratamiento, esto con el fin de ver los cambios en el efecto que tiene el lixiviado sobre el río Tunjuelo en los parámetros estudiados en este trabajo.

7.2 Simulación y resultados.

Siguiendo la metodología explicada en la sección anterior, se presentan los resultados de las simulaciones en las Gráficas 32 a 67. Luego de haber alimentado el modelo, el objetivo para el escenario 1 fue compararlo y validarlo con los resultados reales conseguidos en campo y laboratorio. Para los dos escenarios siguientes su objetivo fue ver que comportamiento tenían los parámetros de calidad con las variaciones en el caudal transportado en el río y la condición inicial con la que empieza el río Tunjuelo antes del vertimiento.

7.2.1 Escenario 1: Q máx. río= 6.73 m³/s

La siguiente ilustración representa un esquema de las condiciones del primer escenario para la simulación.

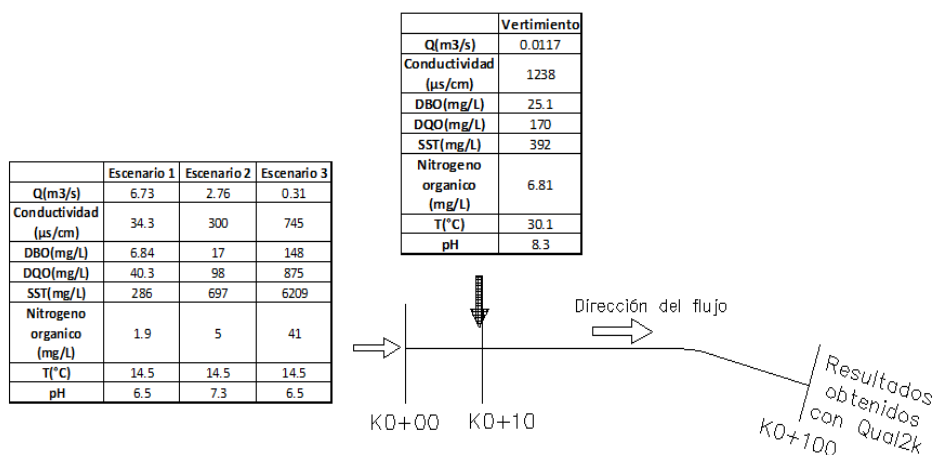
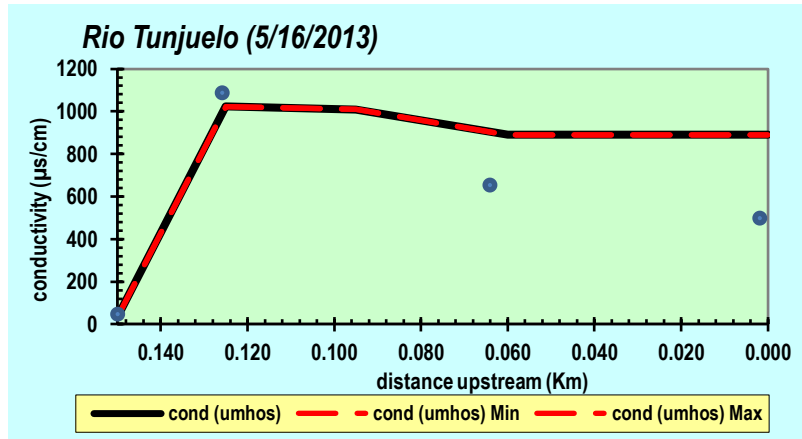


Ilustración 23. Condiciones iniciales para simulación de escenarios

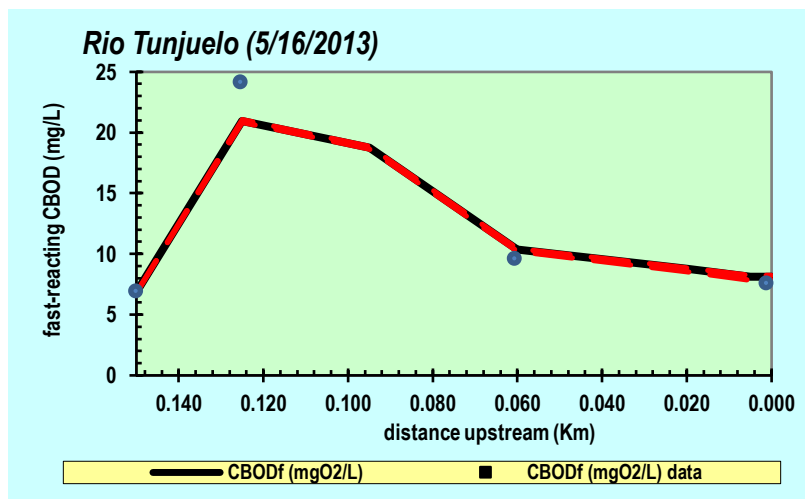
Como se mencionó anteriormente se comparó que los resultados que se obtuvieran con el modelo reflejaran un comportamiento similar al que se obtuvo en campo, a continuación se habla de dichas comparaciones.

Cabe aclarar que el cero indicado en el abscisado, el programa QUAL2K lo toma como el punto más aguas abajo del sistema, y el vertimiento está en la abscisa 0.11 km de todas las gráficas de aquí en adelante.



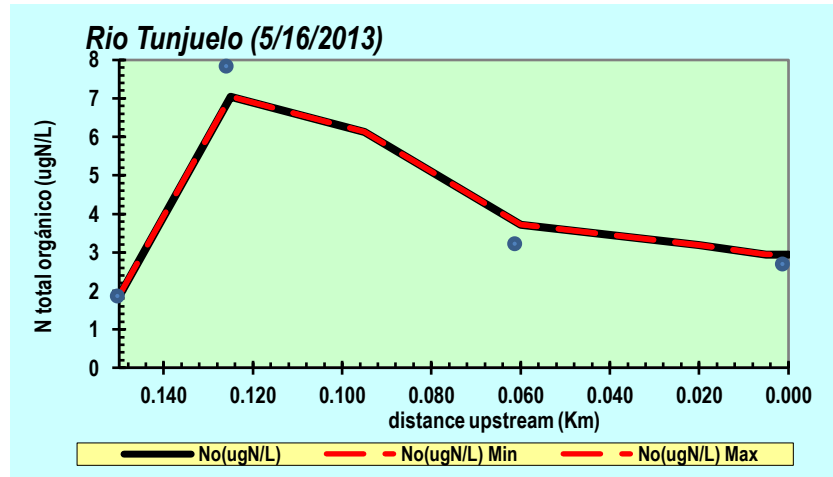
Gráfica 32. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 1

El comportamiento de la conductividad obtenido por el modelo presentado en la Gráfica 32 refleja un comportamiento similar al encontrado en el capítulo 5, en donde en el punto de vertimiento de lixiviado hay un incremento de éste a valores aproximados de los 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y posteriormente descienden hasta estabilizarse.



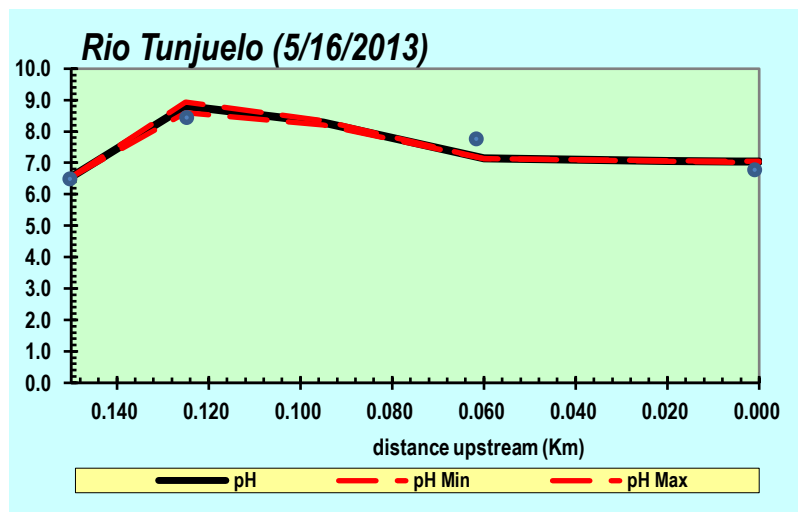
Gráfica 33. CDBO obtenido de Qual2k. Escenario 1

La DBO_5 (Gráfica 33) obtenida en el modelo tiene un incremento en el punto de vertimiento que alcanza aproximadamente a los 23 mg/L y desciende hasta llegar a valores cercanos a los calculados por el modelo antes del vertimiento de 7 mg/L , este comportamiento refleja de manera muy aproximada la realidad que se encontró en campo.



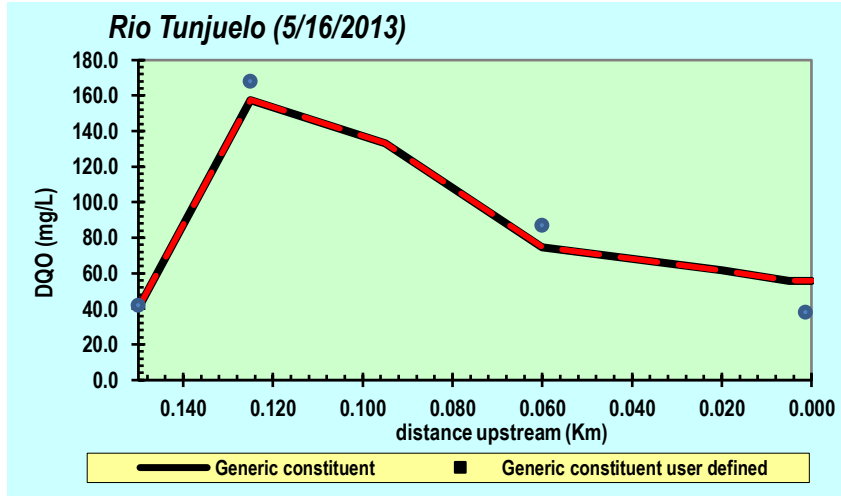
Gráfica 34. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 1.

El nitrógeno total orgánico, Gráfica 34, al igual que los parámetros anteriores muestra el comportamiento encontrado en los resultados de los ensayos de laboratorio evidenciando un pico en el vertimiento llegando a valores de 7-8 mg/L y que finalmente desciende hasta encontrarse unos valores entre 2 y 3 mg/L.



Gráfica 35. pH obtenido de Qual2k. Escenario 1

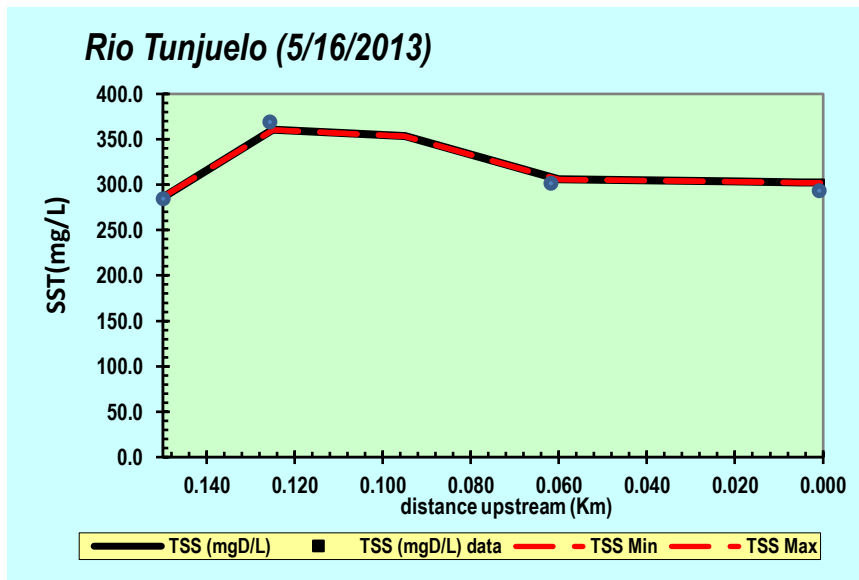
Los resultados del modelo en el parámetro de pH se presentan en la Gráfica 35, y al igual que en campo, evidencia un aumento en el punto de descarga, el cual llega a valores de pH básicos en el río aproximadamente de 8 o 9 y finaliza con valores alrededor de 7.



Gráfica 36. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 1

La DQO, Gráfica 36, representada en el modelo da como resultado en el punto del vertimiento valores alrededor de los 170 mg/L, y finaliza aguas abajo en valores alrededor de 60 mg/L, que son valores aproximados a los que se obtuvo durante los muestreos y reflejan el comportamiento que se ha tenido en campo.

La DQO representada en el modelo da como resultado en el punto del vertimiento valores alrededor de los 170 mg/L, y finaliza aguas abajo en valores alrededor de 60 mg/L, que son valores aproximados a los que se obtuvo durante los muestreos y reflejan el comportamiento que se ha tenido en campo.



Gráfica 37. SST obtenido de Qual2k. Escenario 1

En cuanto a los sólidos suspendidos totales presentados en la Gráfica 37, se logra observar que, al igual que los parámetros mencionados anteriormente, su

comportamiento refleja de manera aproximada la realidad que se tuvo de este parámetro en el río.

Concluyendo acerca del modelo de calidad del agua, se encuentra que los resultados obtenidos por el programa permiten representar de una manera semejante tanto el comportamiento, como los valores esperados de los parámetros medidos en campo para dicho escenario, es así que al encontrar una respuesta óptima por parte del modelo se prosiguió con la realización de los siguientes escenarios.

7.2.2 Escenario 2: Q medio río= 2.76 m³/s

El presente escenario presenta las siguientes condiciones iniciales para la simulación.

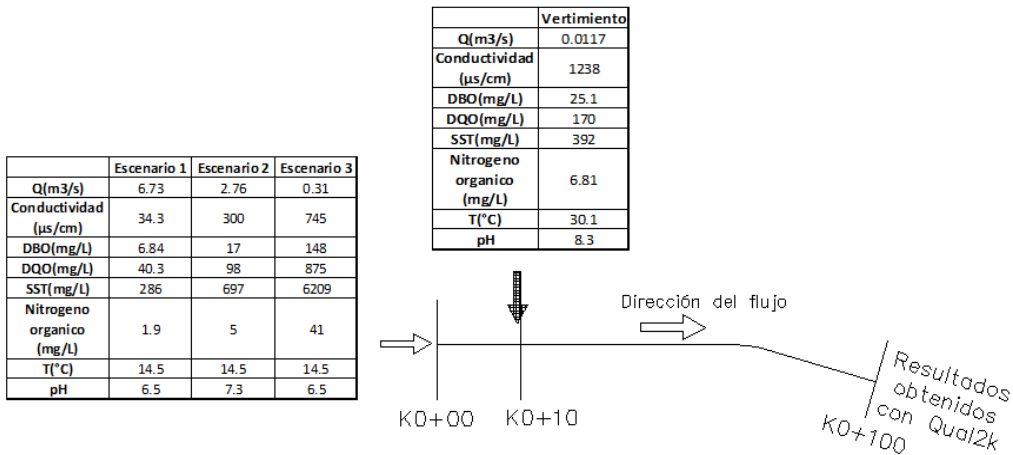
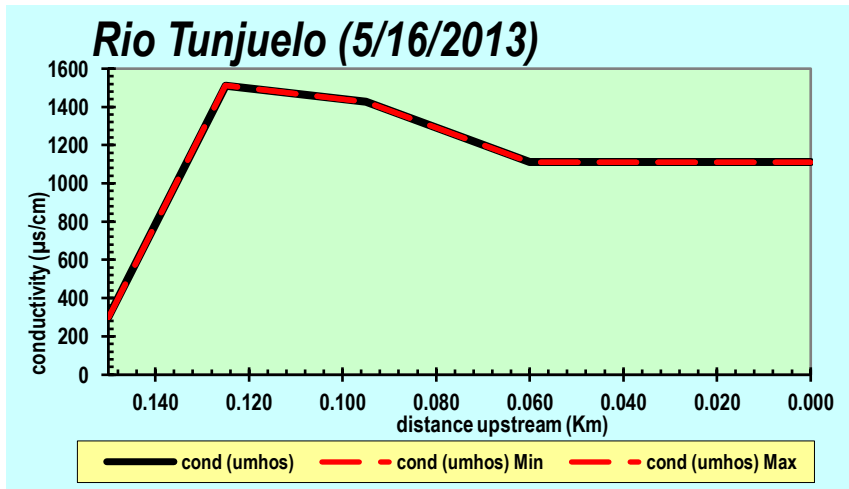
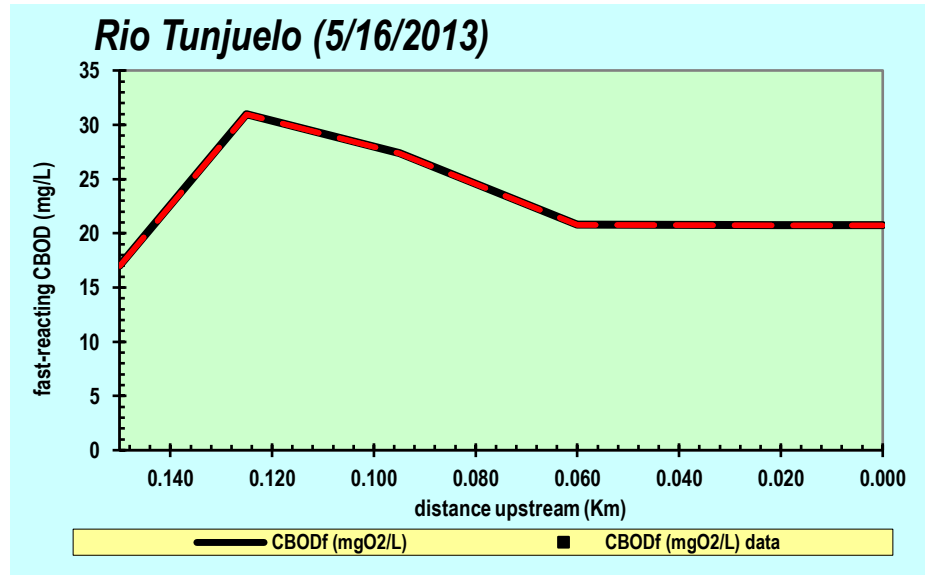


Ilustración 24. Condiciones iniciales para simulación de escenarios



Gráfica 38. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 2

La conductividad en este escenario aumenta su valor aguas arriba debido a la disminución del caudal del río. Se observa, con este cambio, que el pico obtenido por el vertimiento del lixiviado aumenta hasta valores de 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, posteriormente estos valores disminuyen para luego estabilizarse, como en el escenario 1.



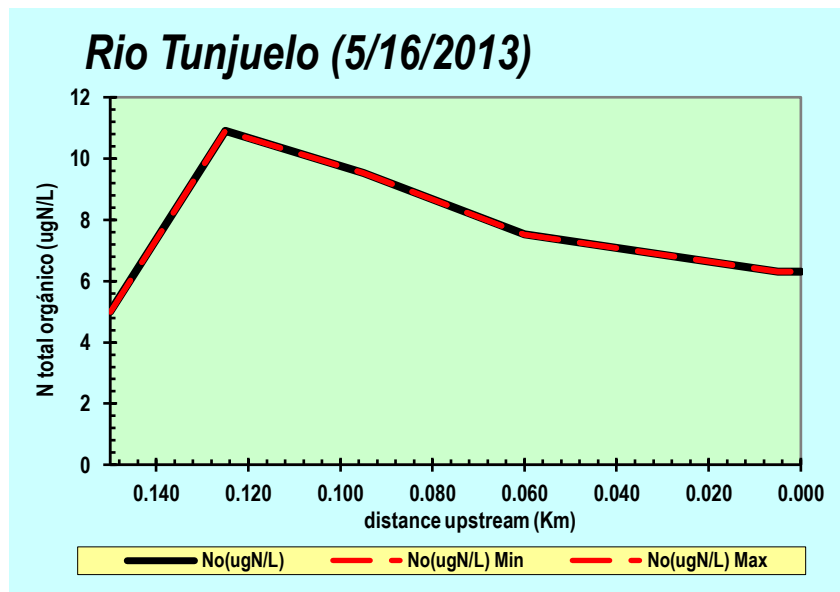
Gráfica 39. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 2

Los valores de DBO_5 subieron debido a que el caudal del río ha disminuido en comparación al primer escenario, y es así que al tener un menor caudal en su curso, su capacidad de disolución o de asimilación de la carga contaminante disminuye (Cervantes Nemer, 2009), por lo cual el río se ve más afectado por la descarga que en la situación del primer escenario.

En la Gráfica 39 se observa que los valores de DBO_5 inician en un valor de 17 mg/L lo que clasifica al agua como aceptable (Sánchez, 2007), y finaliza con un valor alrededor de 21 mg/L, clasificándola nuevamente como aceptable (Sánchez, 2007), lo que finalmente comprueba que el vertimiento de lixiviados no afecta la clasificación del río luego de la mezcla. Respecto al escenario uno se ve que si hay una alteración de la clasificación del agua pasando de buena calidad a aceptable luego de la disminución del caudal en el escenario 2.

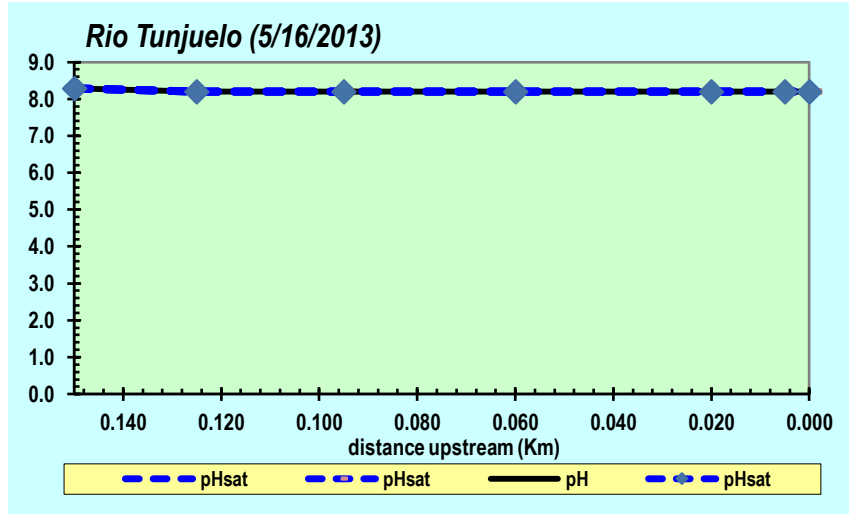
Respecto la resolución 3956 de 2009 en la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital y que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006 donde se establecen los objetivos de calidad de agua que se deben cumplir, se encuentra que el valor de DBO_5 obtenido tanto aguas arriba del vertimiento como aguas abajo, cumplen con lo establecido por dicho acuerdo donde se define el límite de 50 mg/L.

El nitrógeno total orgánico al igual que la DBO₅ aumenta sus valores debido a la disminución del caudal transportado por el río, se obtienen valores al final de alrededor de 6 o 7mg/L por lo cual este parámetro genera una mayor probabilidad de riesgo en el río en cuanto a que se generen procesos biológicos que agoten el oxígeno disuelto en el río y que a consecuencia de que haya baja presencia de oxígeno disuelto, el cuerpo de agua tenga mayor dificultad a la hora de asimilar o descomponer químicamente y biológicamente la materia orgánica proveniente de la descarga de lixiviados.



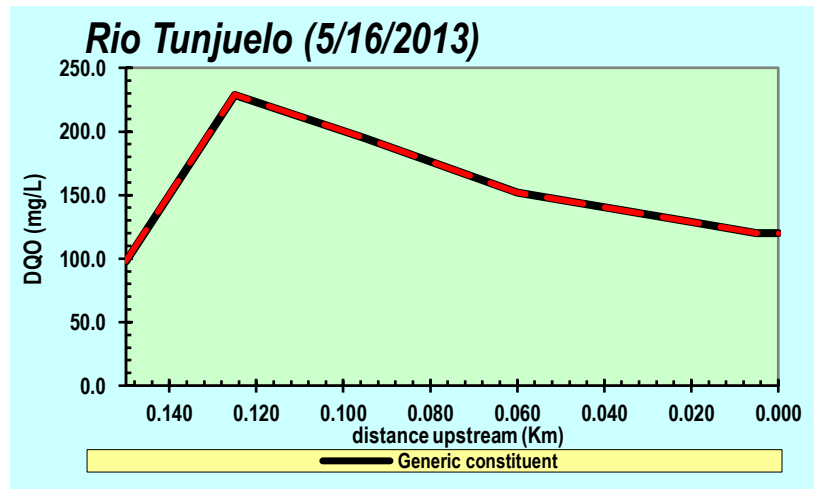
Gráfica 40. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 2

El pH mostrado en la Gráfica 41 muestra un comportamiento similar al encontrado en situaciones anteriores, donde no se presentan grandes variaciones en sus valores, éste mantiene un valor de aproximado de 8 que se encuentra dentro del rango de 4.5 a 9.0 definido por la resolución 3956 de 2009 que refiere el Acuerdo CAR 43 de 2006, y además se encuentra en el rango de 6.0 a 9.0 que es considerado indicado para brindar protección a la vida acuática (Sánchez, 2007).

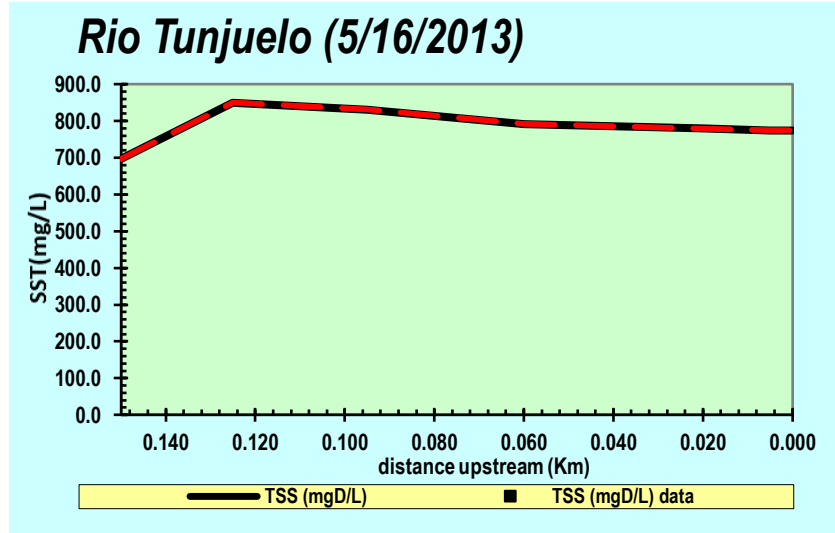


Gráfica 41. pH obtenido de Qual2k. Escenario 2

La DQO en el modelo continúa mostrando la tendencia descrita anteriormente, donde se presenta el pico en el punto del vertimiento y posteriormente se produce un descenso de los valores hasta su estabilización. Los valores de este parámetro aumentaron con respecto al primer escenario, a causa de la baja del caudal que transporta el río, los valores de éste se encuentran alrededor del punto del inicial en 100mg/L y finaliza con valores de 120mg/L, para estos puntos se encuentra que los valores que se obtienen se encuentran clasificados como fuentes de agua contaminadas. Con respecto a los resultados obtenidos en el escenario 1 no hay variación en cuanto a la clasificación del agua.



Gráfica 42. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 2



Gráfica 43. SST obtenido de Qual2k. Escenario 2

Por último los sólidos suspendidos totales también se ven afectados por el cambio en el caudal del río, en donde al mantener la misma proporción de sólidos suspendidos que se descargan dentro del cuerpo de agua con un menor caudal, hace que la concentración de estos sea más alta que en el primer escenario, al verse incrementados estos valores trae como consecuencia un incremento en los parámetros como el color y la turbiedad, Los valores obtenidos en dicho parámetro se encuentran entre 700 y 800 mg/L. el cual sobrepasa el valor permisible dado en la resolución 3956 de 2009 que refiere el Acuerdo CAR 43 de 2006, para agua con uso clase IV que es “Uso agrícola con restricciones y pecuario” de 40 mg/L.

7.2.3 Escenario 3: Q mín. río= 0.31 m³/s

El presente escenario presenta las siguientes condiciones iniciales para la simulación.

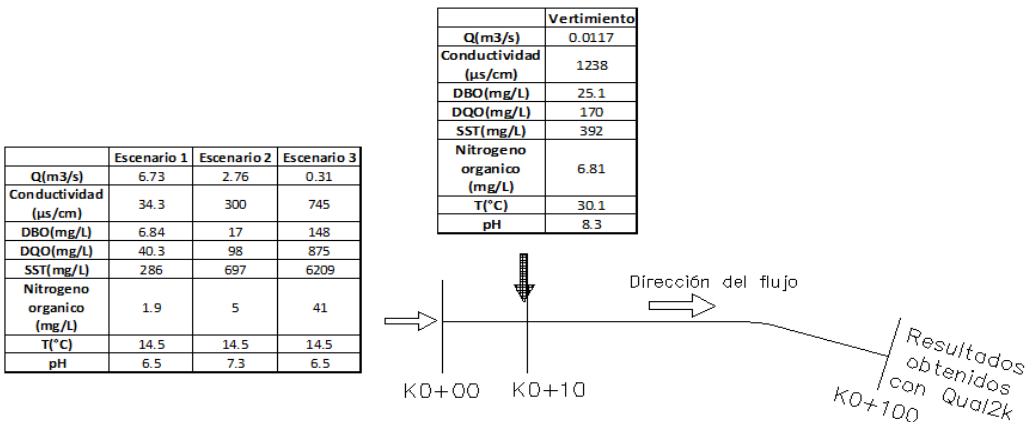
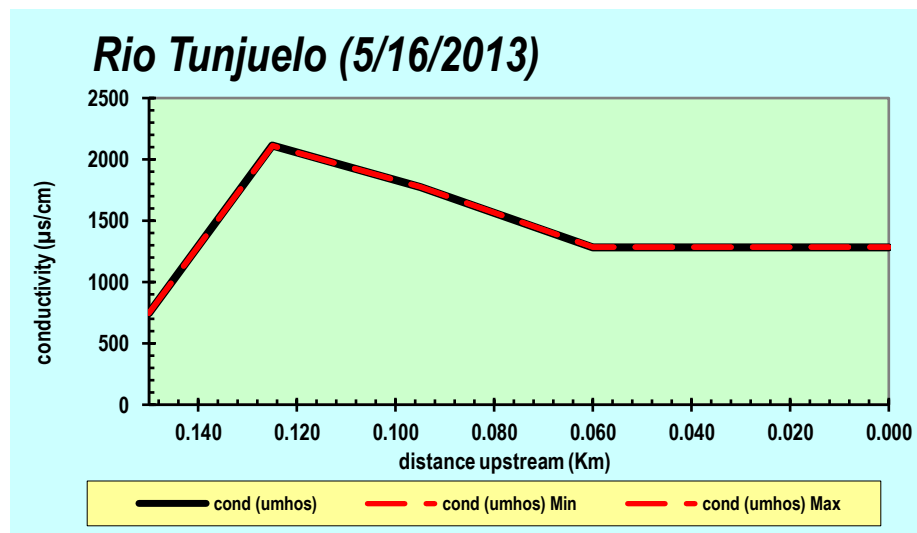


Ilustración 25. Condiciones iniciales para simulación de escenarios

Para el escenario 3 se supuso una situación crítica en donde se encuentra un caudal mínimo en el río, para esta situación se buscó mantener una proporcionalidad en la concentración de los valores de los parámetros aguas arriba del vertimiento con el caudal que transporta el río. Es así que al realizar dicha proporcionalidad los parámetros aguas arriba aumentaron de tal forma que se tiene una condición donde el río presenta unos niveles de contaminación bastante altos antes de recibir la descarga del lixiviado, sin embargo a pesar de la mala condición en la que viene el río se sigue manteniendo la constante en que el lixiviado incrementa la concentración de los parámetros pero no es determinante a la hora de generar un impacto fuerte sobre estos en el río, los resultados en los parámetros muestran:

La conductividad como se presenta en la Gráfica 44 inicia en un valor de 745 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y termina luego de la descarga del vertimiento de lixiviados en valores cercanos a los 1280 $\mu\text{s}/\text{cm}$ donde termina su proceso de estabilización. Como se mencionó anteriormente se pueden ver como los órdenes de magnitud de dicho parámetro incrementaron desde aguas arriba respecto a los dos escenarios anteriores.

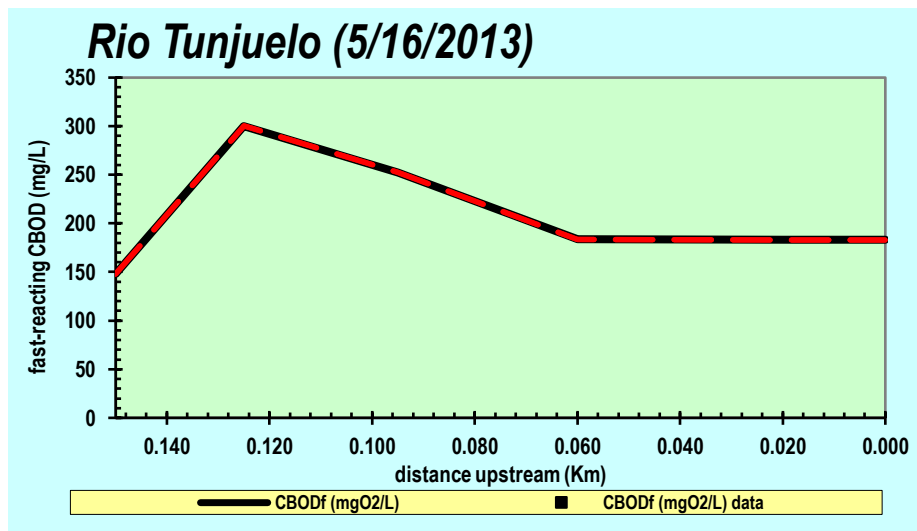


Gráfica 44. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 3

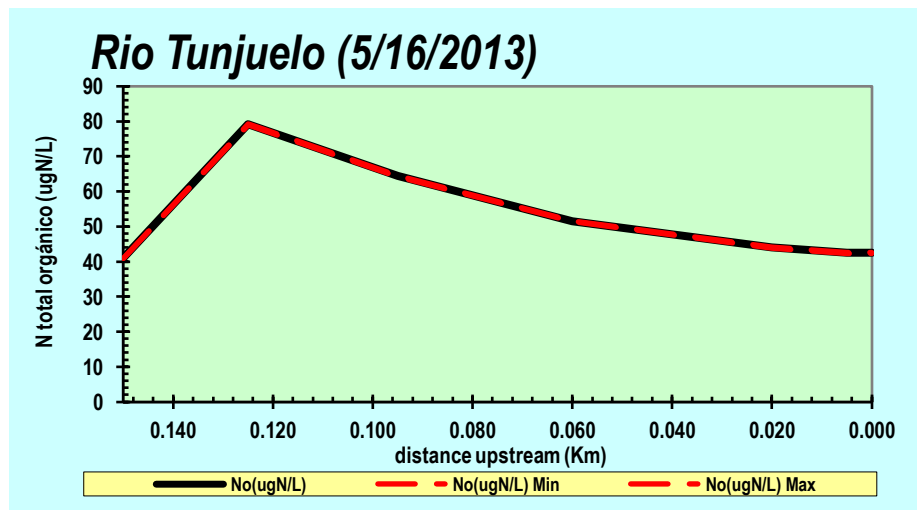
Respecto a la DBO_5 que se presenta en la Gráfica 45, el comportamiento de este parámetro muestra un incremento en los valores por la disminución del caudal, y estos como se mencionó anteriormente se ven aumentados desde aguas arriba del vertimiento donde inicia con un valor de 148 mg/L y finaliza con un valor alrededor de los 180 mg/L . Para dichos valores de DBO_5 se encuentra que la clasificación en la que se encuentra el agua del río es de “fuertemente contaminada” (Sánchez, 2007) y si se compara con las clasificaciones obtenidas en los escenarios 1 y 2, se encuentra que la del escenario 3 es la que en peor condición de clasificación ésta.

Siguiendo la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006 se encuentra los valores obtenidos tanto aguas arriba del vertimiento como aguas debajo de éste no cumplen con el límite establecido en dicho acuerdo.

El nitrógeno total orgánico como se presenta en la Grafica 46 incrementa su concentración y obtiene valores iniciales alrededor de 40 mg/L y finaliza con valores cercanos a los 43mg/L, lo cual indica que para este rango de valores se cuenta con una clasificación de “Concentraciones Altas” (*Tchobanoglous, Burton y Stensel, 2003*) que generan un impacto negativo en la presencia de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

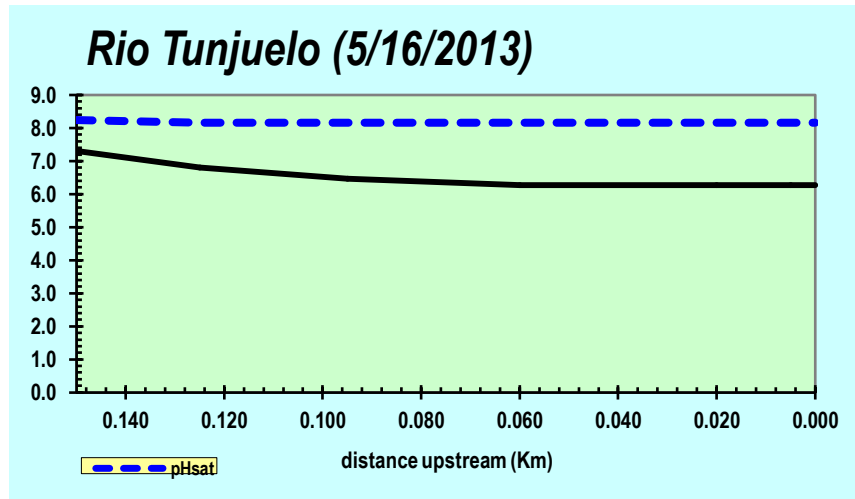


Gráfica 45. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 3



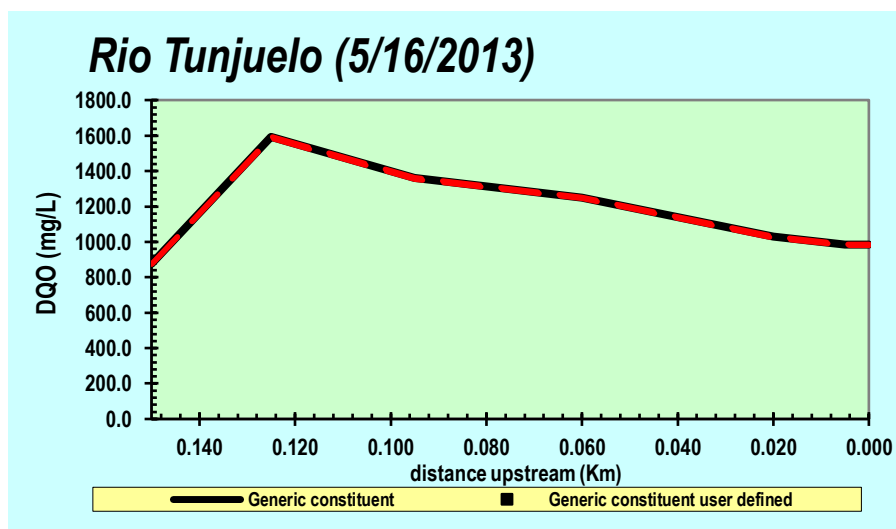
Gráfica 46. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 3

En el parámetro de pH presentado en la Gráfica 47, se encuentra que al finalizar la mezcla alcanza valores menores a 7 (pH ácido), y se encuentra que dichos valores se encuentran dentro del rango que permite brindar protección a la vida acuática (Sánchez, 2007).

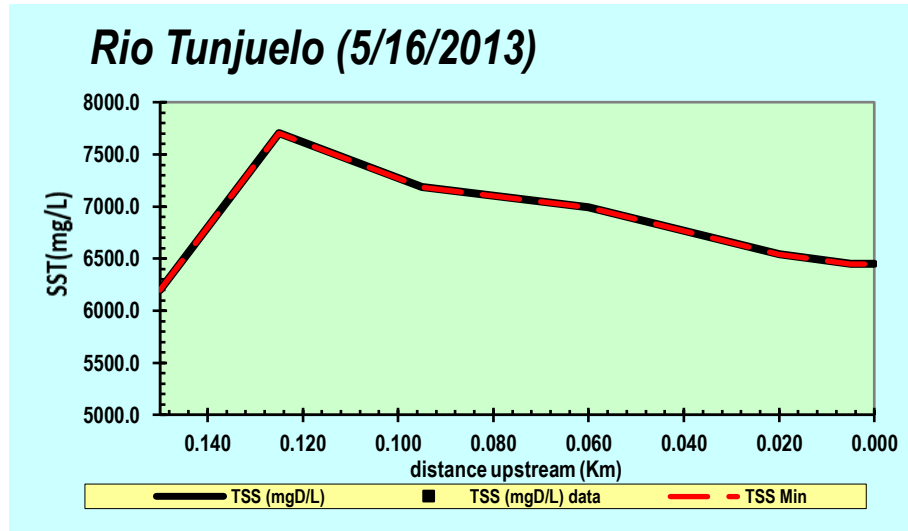


Gráfica 47. pH obtenido de Qual2k. Escenario 3

La DQO tiene como resultado valores de 870mg/L aguas arriba del vertimiento y 980 mg/L al final de la descarga de lixiviado, clasificando el río como “fuertemente contaminada” en ambos casos (Sánchez, 2007), en dicha grafica se evidencia como las concentraciones de los parámetros aumentan, y se empeora la calidad del río por disminuir su caudal desde aguas arriba del vertimiento. Este escenario comparado con los anteriores realizados (escenarios 1 y 2) se encuentra que su clasificación es más crítica y pasa de una situación de “contaminada” a “fuertemente contaminada”.



Gráfica 48. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 3



Gráfica 49. SST obtenido de Qual2k. Escenario 3

El parámetro de SST presentado en la Gráfica 49, muestra un valor aguas arriba de 6200 mg/L y finaliza con 6500 mg/L, valores con los que se muestra el aumento de la concentración de sólidos respecto a los escenarios anteriores dado el descenso de caudal presente en el río en este escenario. Observando el cambio de las concentraciones conforme varía el caudal, se puede evidenciar que desde un inicio las condiciones del río para este escenario marcan un nivel de contaminación alto donde los sólidos suspendidos totales superan por mucho el nivel permitido por la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, para agua con uso clase IV “Uso agrícola con restricciones y pecuario”.

7.2.4 Escenario 4: Q máx. río= 6.73 m³/s con vertimiento de lixiviado sin tratar.

Los siguientes tres escenarios 4, 5 y 6 simularon una condición en donde se cambiaba la calidad del vertimiento del lixiviado. Para esto se toman valores propios del lixiviado sin que pase por los tratamientos realizados en la PTL Doña Juana.

Q=0.0117m3/s				
Cond	DBO ₅	DQO	SST	NTO
µs	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
36000	9000	18000	8000	3000

Tabla 13. Parámetros de Calidad del Lixiviado.

El presente escenario presenta las siguientes condiciones para la simulación.

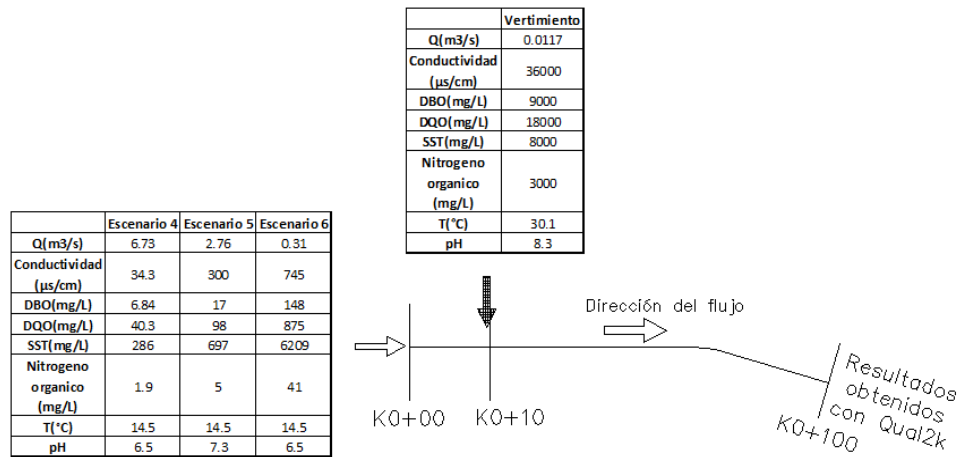
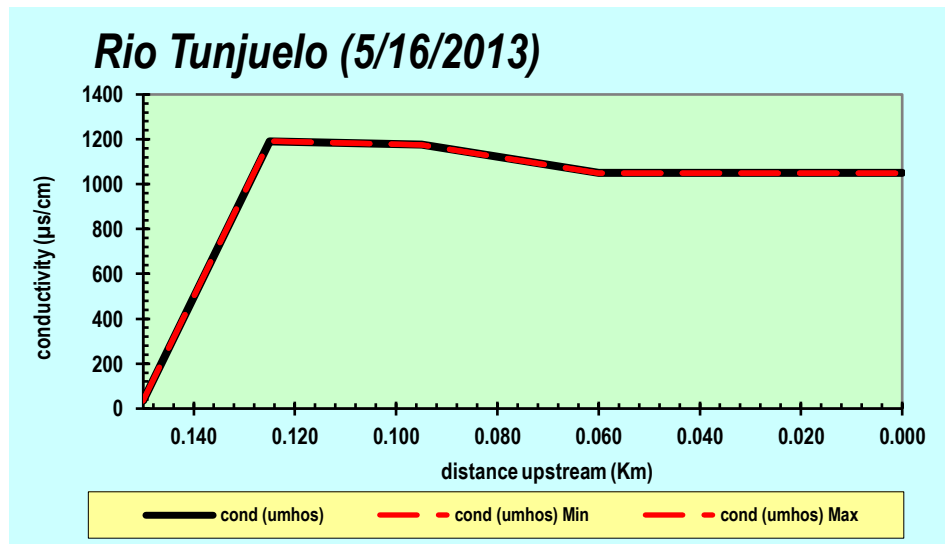


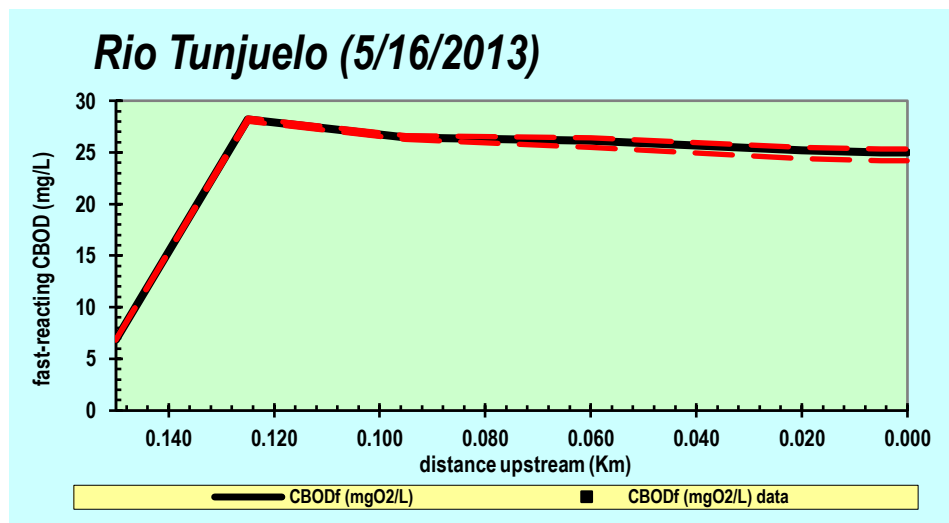
Ilustración 26. Condiciones para simulación escenario 4.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

La conductividad aumento sus valores en el pico del vertimiento llegando a 1200 µs/cm respecto al escenario 1, que cuenta con la misma condición inicial de caudal en el río, posteriormente éste tiende a descender su valor pero con la diferencia que, en esta situación es menor este descenso debido a que la carga contaminante que se descargó en el río Tunjuelo tiene concentraciones mayores.



Gráfica 50. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 4



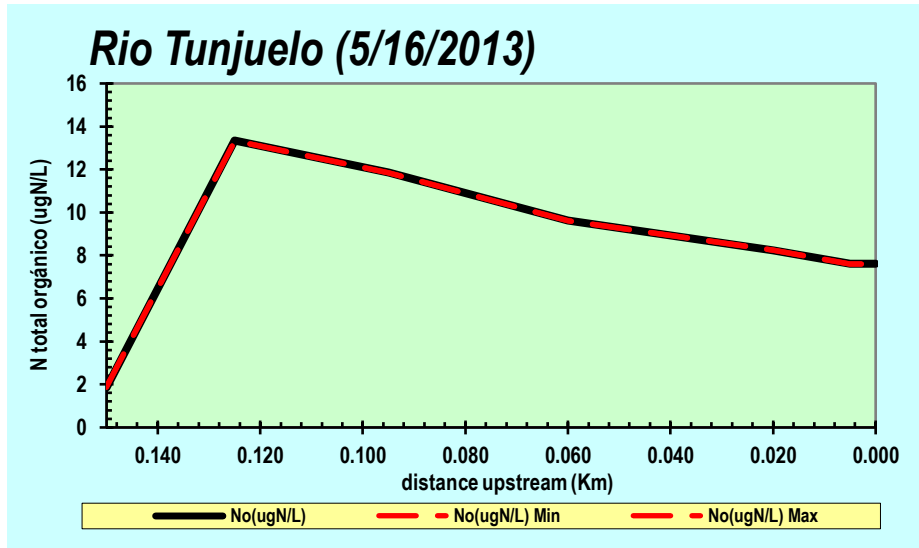
Gráfica 51. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 4

Respecto a la DBO_5 , también se encontró un aumento en el valor del punto del vertimiento con respecto al escenario 1, sin embargo a pesar del incremento en las concentraciones del vertimiento del lixiviado, el río logra terminar con un valor cercano a 25 mg/L que es considerablemente más alto al obtenido en el primer escenario. Dicho valor con el que finaliza corresponde a una clasificación del agua de “aceptable” (Sánchez, 2007).

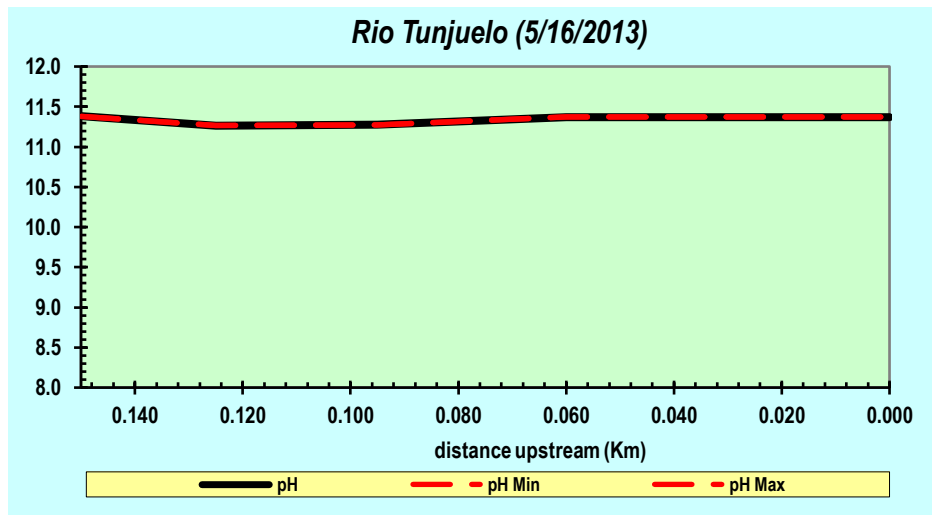
Respecto a los límites establecidos en la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, se encuentra que los valores obtenidos en este parámetro, que fueron menores de 50 mg/L durante todo el tramo de estudio, cumplen con el requisito establecido por dicho acuerdo.

Para que este parámetro DBO_5 siguiendo las condiciones del modelo no alcance a cumplir con dicho acuerdo se debe tener un vertimiento con una concentración de la DBO_5 de aproximadamente el doble.

Para el caso del nitrógeno total orgánico se encuentra que los valores obtenidos incrementaron con respecto al primer escenario descrito en este trabajo en donde para este escenario el nitrógeno total orgánico alcanza un valor cercano a los 14 mg/L, en el momento en el que se descarga el lixiviado en el río. Posterior a este aumento el río se mezcla y logra disminuir la concentración del nitrógeno total orgánico, llegando a un valor de 7,7 que también supera el valor final encontrado en el escenario 1, en donde para este valor se tiene una clasificación de “Concentraciones Medias” (Tchobanoglous, Burton y Stensel, 2003) que generan un impacto negativo en la presencia de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

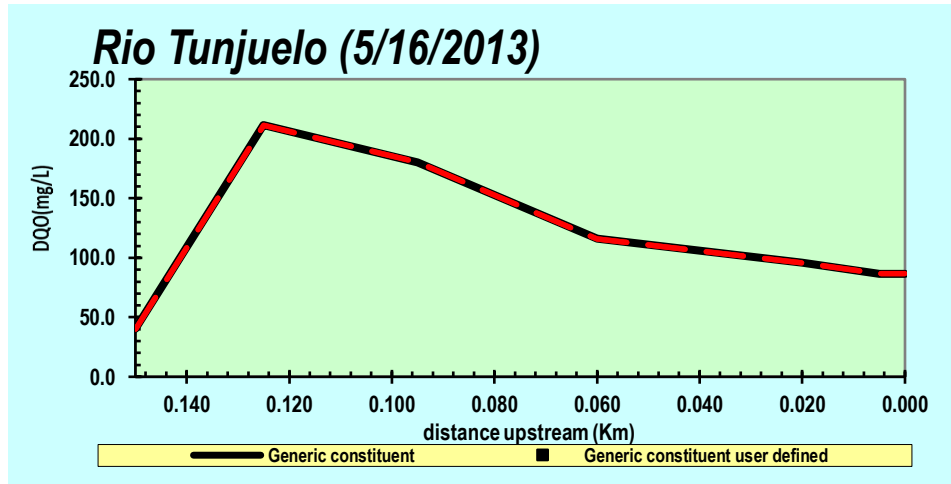


Gráfica 52. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 4



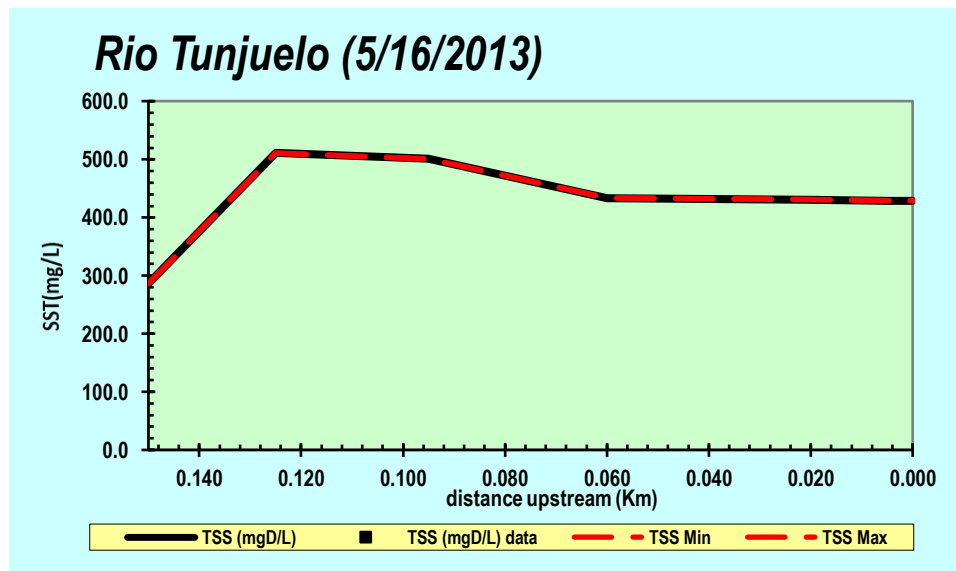
Gráfica 53. pH obtenido de Qual2k. Escenario 4

El pH se mantiene en valores por encima de 7 durante todo el proceso, esto debido a que la carga contaminante que tiene el lixiviado es básico, y al incluirlo en el río con concentraciones altas como las que se proponen para este escenario, se vuelve incapaz el río de cambiar radicalmente el valor de pH. Este valor se sale de lo permitido para el vertimiento de lixiviado según la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR de 2006, donde el rango está entre 4.5 – 9.



Gráfica 54. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 4

La DQO tiene como resultado valores de 41 mg/L aguas arriba del vertimiento y 86 mg/L al final de la descarga de lixiviado, clasificando el río como “contaminado” en ambos casos (Sánchez, 2007), a pesar de que los valores incrementaron considerablemente con respecto al escenario 1, estos tienen la misma clasificación.



Gráfica 55. SST obtenido de Qual2k. Escenario 4

El parámetro de SST, muestra un incremento en sus valores con respecto al escenario 1, donde se llegan a valores de 430 mg/L. Siguiendo la exigencia por la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006 se encuentra que los valores de este parámetro exceden al límite establecido.

7.2.5 Escenario 5: Q medio río= 2.76 m³/s con vertimiento de lixiviado sin tratar.

El presente escenario presenta las siguientes condiciones para la simulación.

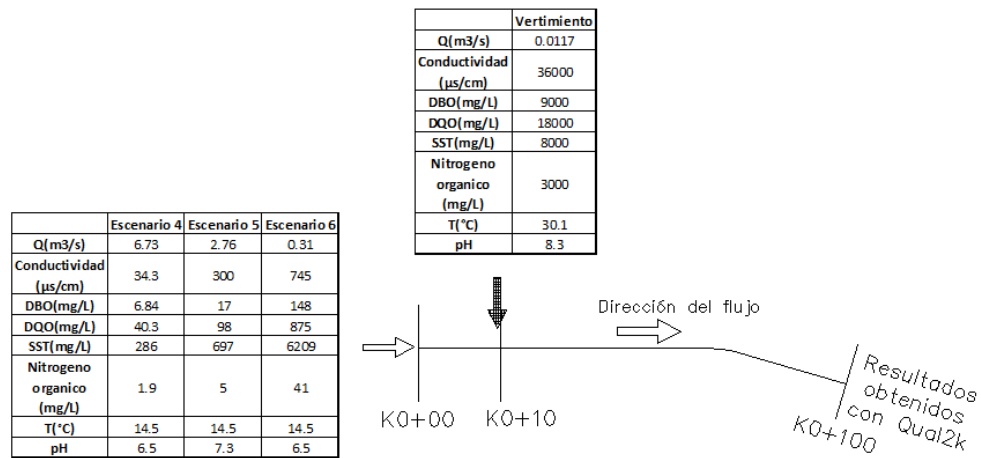
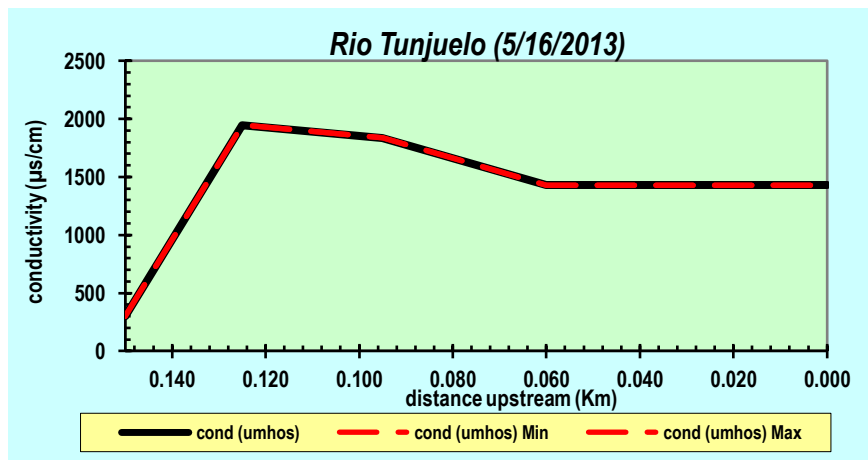


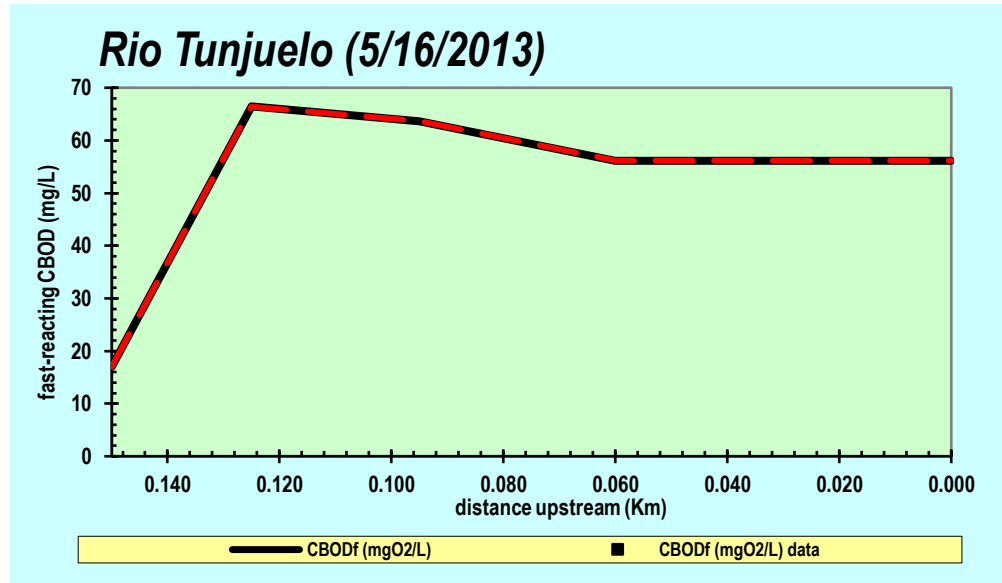
Ilustración 27. Condiciones para simulación escenario 5.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el modelo.



Gráfica 56. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 5

La conductividad en este escenario aumentó con respecto al escenario 4 y al escenario 2, llegó aproximadamente a 1950 µs/cm, esto debido a la disminución en el caudal del río y al aumento de la concentración en los parámetros del lixiviado vertido, lo que genera que las concentraciones de todos los parámetros aumenten, ya que hay un menor volumen de agua en el cual se puede disolver el afluente del contaminante.



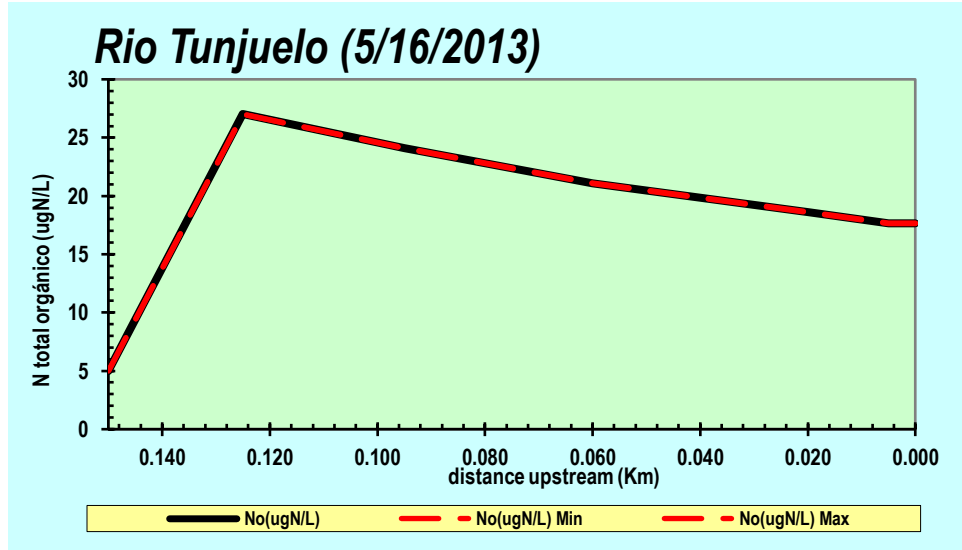
Gráfica 57. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 5

Respecto al escenario 2, que cuenta con el mismo caudal en el río, se pudo evidenciar que el aumento en la concentración de la DBO₅ en el caudal de vertimiento del lixiviado, causó que este parámetro aumentara un poco más del doble en su punto máximo (el pico del vertimiento). Al final del tramo de estudio, el río con las condiciones reales de lixiviado tiene valores de 21 mg/L y en esta situación alcanza valores cercanos a los 56 mg/L. Esto ocasiona que el río entre en la clasificación de contaminada (Sánchez, 2007), mientras que en el escenario 2 estaba en el rango de agua aceptable. (Sánchez, 2007).

Respecto a la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo 43 de 2006 se encuentra que el valor es cercano al límite establecido por éste, sin embargo se encuentra por encima de los 50 mg/L por lo cual no está cumpliendo esta exigencia.

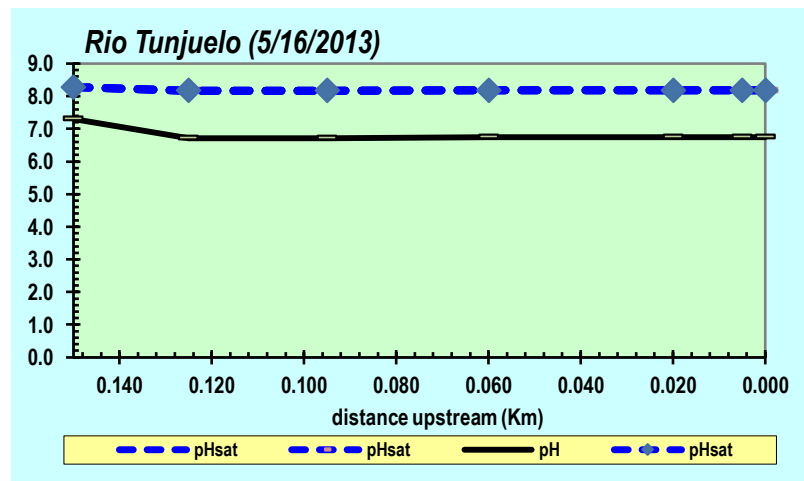
El límite que tendría que tener el vertimiento en este parámetro de DBO₅ para que cambie de una condición de cumplimiento a incumplimiento es de aproximadamente 6500 mg/L, valores menores a éste hacen que se cumpla con la exigencia de dicho acuerdo.

El nitrógeno total orgánico también aumenta un poco más del doble su concentración pasando de 11 mg/L (escenario 2) a 27 mg/L en esta ocasión, pues al aumentar la concentración de este parámetro en el caudal del vertimiento se produce el aumento de la concentración de dicho parámetro en el río, y es así como se muestra en la gráfica 58 donde al final del tramo de estudio en el río llega a valores de 17 mg/L, valor que es más alto al encontrado en el escenario 2.



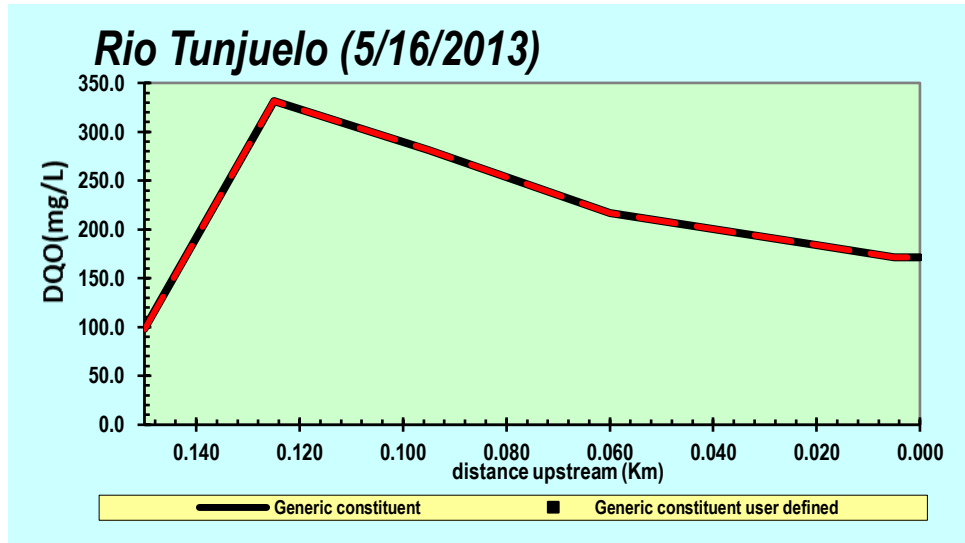
Gráfica 58. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 5

El pH llega a valores por debajo de 7 clasificándolo como ácido, en esta situación los valores de pH cumplen con lo exigido en la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, pues entra en el rango definido de 4.5 - 9.0.



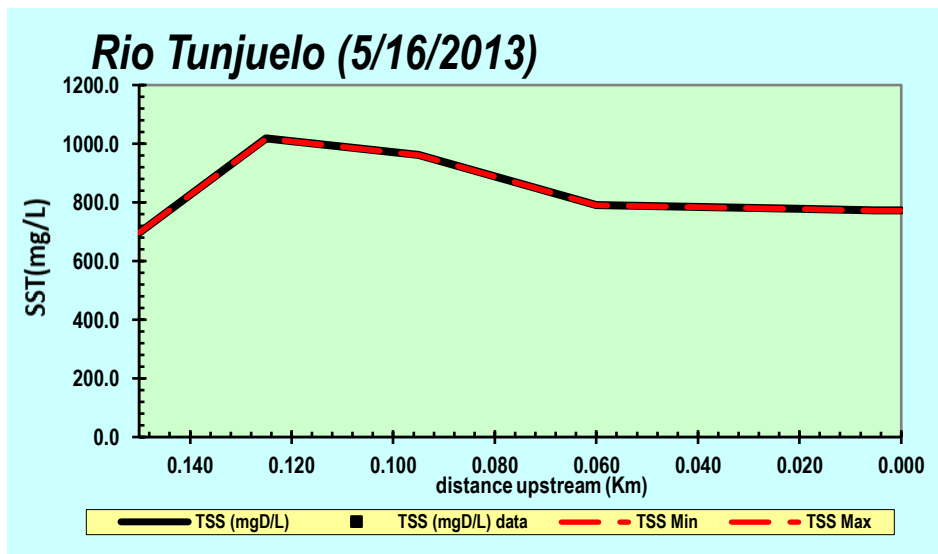
Gráfica 59. pH obtenido de Qual2k. Escenario 5

La DQO pasa en el punto de vertimiento de 230mg/L en el escenario 2, a 330 mg/L en este escenario, y al final del tramo en estudio llega a 171 mg/L, mostrando como afecta el verter un lixiviado con concentraciones más altas en sus parámetros de calidad. Su clasificación luego del vertimiento y la mezcla pasa de ser considerada como contaminada a fuertemente contaminada (Sánchez, 2007).



Gráfica 60. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 5

Los SST pasan en su punto más alto en el vertimiento de 850 mg/L a 1020 mg/L, en el escenario 2 y 5 respectivamente. El punto final llega a 772 mg/L, con lo que se ve que el incremento fue producto de las variaciones realizadas en la concentración de los parámetros en el lixiviado. Todos los valores anteriormente mencionados sobrepasan el valor máximo permitido por la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, donde este tipo de agua clasificado como clase IV que es “Uso agrícola con restricciones y pecuario” tiene un límite de 40 mg/L.



Gráfica 61. SST obtenido de Qual2k. Escenario 5

7.2.6 Escenario 6: Q mín. río= 0.31 m³/s con vertimiento de lixiviado sin tratar.

El presente escenario presenta las siguientes condiciones para la simulación.

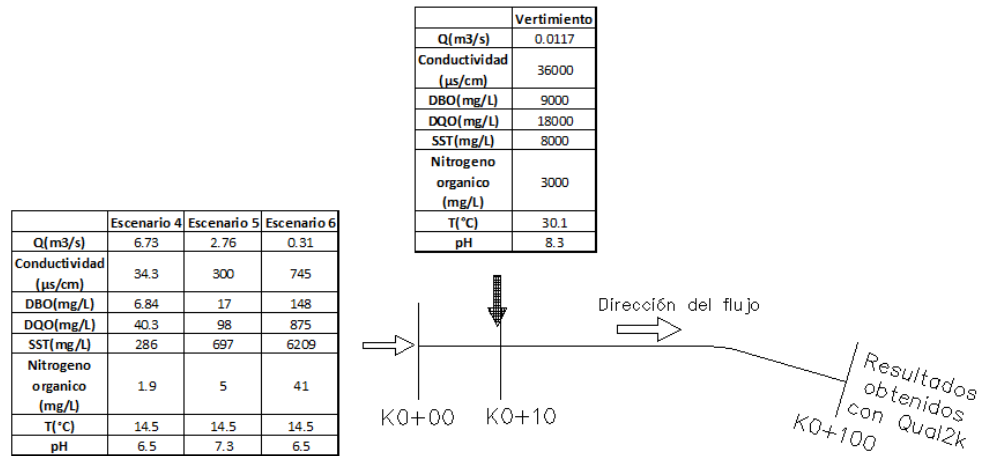
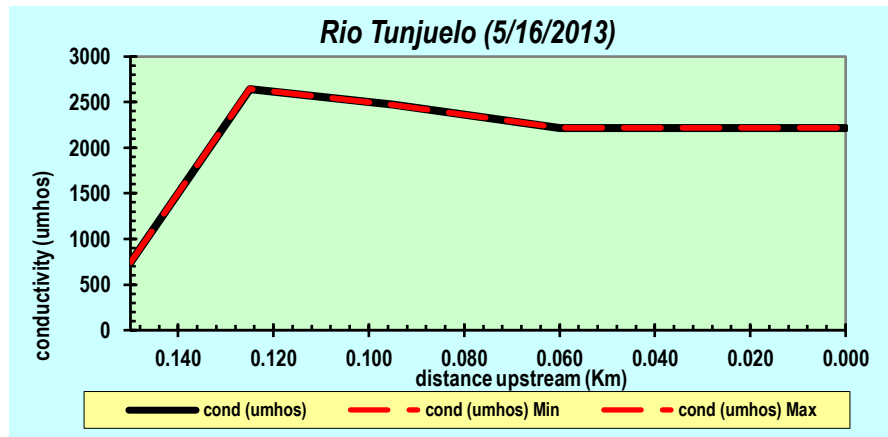


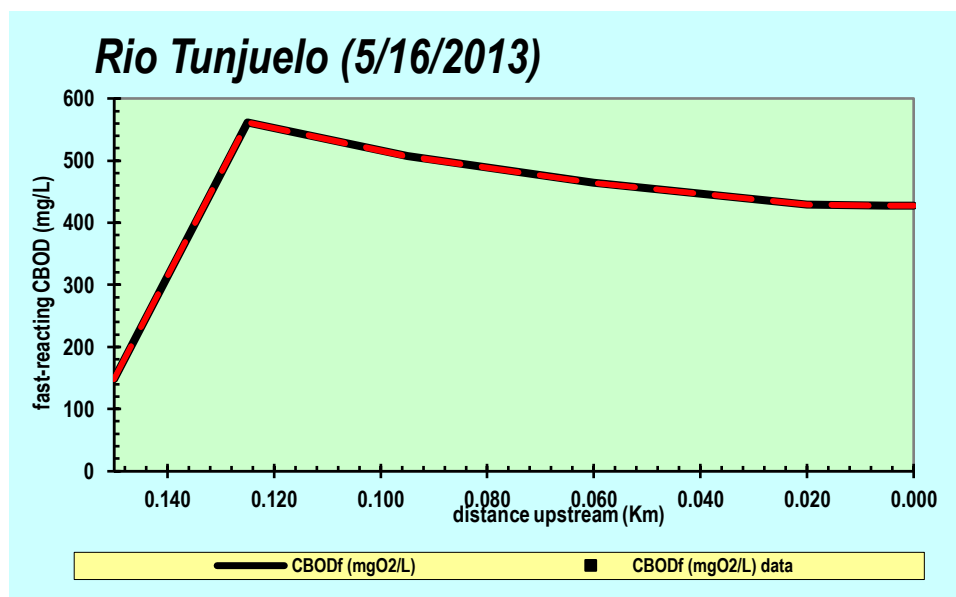
Ilustración 28. Condiciones para simulación escenario 6.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el modelo.



Gráfica 62. Conductividad obtenida de Qual2k. Escenario 6

La conductividad muestra un aumento en su punto máximo, en el vertimiento, de más de 500 µs/cm del escenario anterior (escenario 5) a éste, lo que muestra como la disminución del caudal afecta la concentración de sales en el agua, concentración que produce el aumento en la conductividad del río.

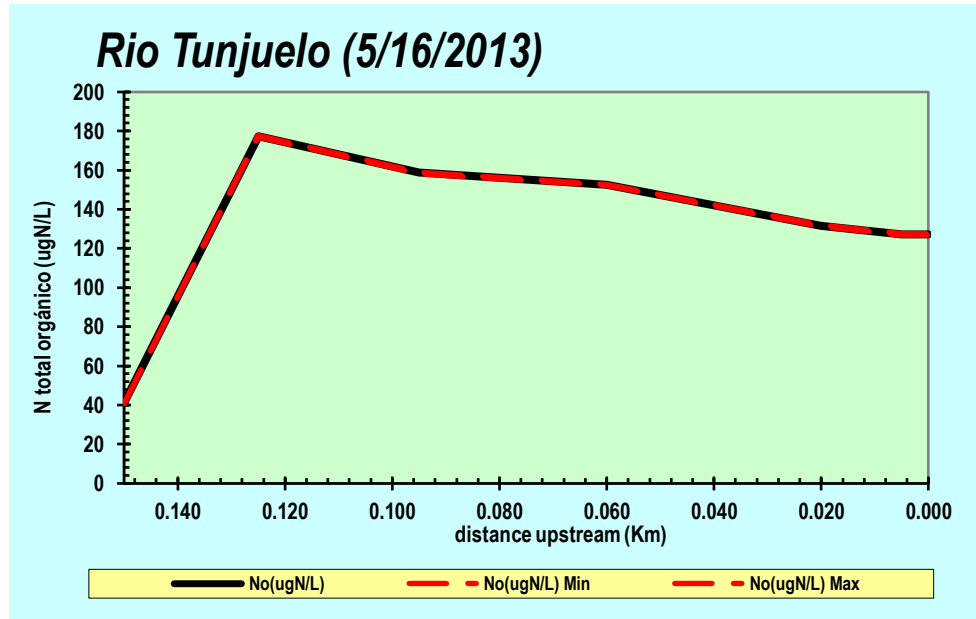


Gráfica 63. CDBO obtenida de Qual2k. Escenario 6

Respecto a la DBO_5 presentada en la gráfica 63, este parámetro muestra un aumento en su concentración debido nuevamente a la disminución del caudal, esto se evidencia con respecto al escenario 3 en el punto de vertimiento donde se pasa de 300 mg/L (Valor obtenido en escenario 3) a 560 mg/L (valor obtenido en escenario 6).

El río es capaz de diluir algo de esta carga dejando al final del tramo de estudio valores de 430 mg/L aproximadamente, mientras que con la calidad del lixiviado que realmente se vierte este valor final se encontraba en 180 mg/L. Para el caso del escenario 3, se había encontrado que el agua clasificaba como fuertemente contaminada, en este caso es de esperarse que continúe en esta clasificación, dado el aumento de las concentraciones de contaminantes en el lixiviado, confirmando esto, los valores obtenidos al final del tramo de estudio de aproximadamente 430 mg/L clasifican nuevamente a el cuerpo de agua como fuertemente contaminada (Sánchez, 2007).

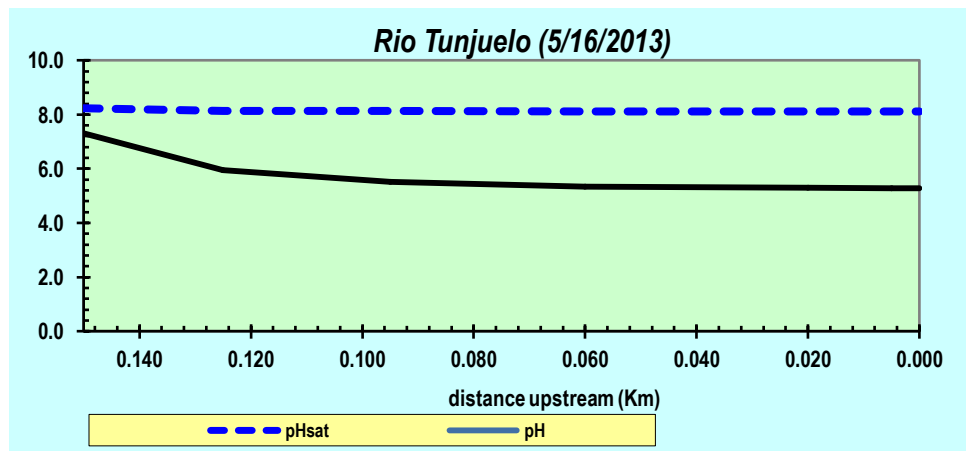
Respecto a la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo 43 de 2006 se encuentra que el valor DBO_5 se encuentra por encima de los 50 mg/L por lo cual no cumple con esta exigencia.



Gráfica 64. Nitrógeno total orgánico obtenido de Qual2k. Escenario 6

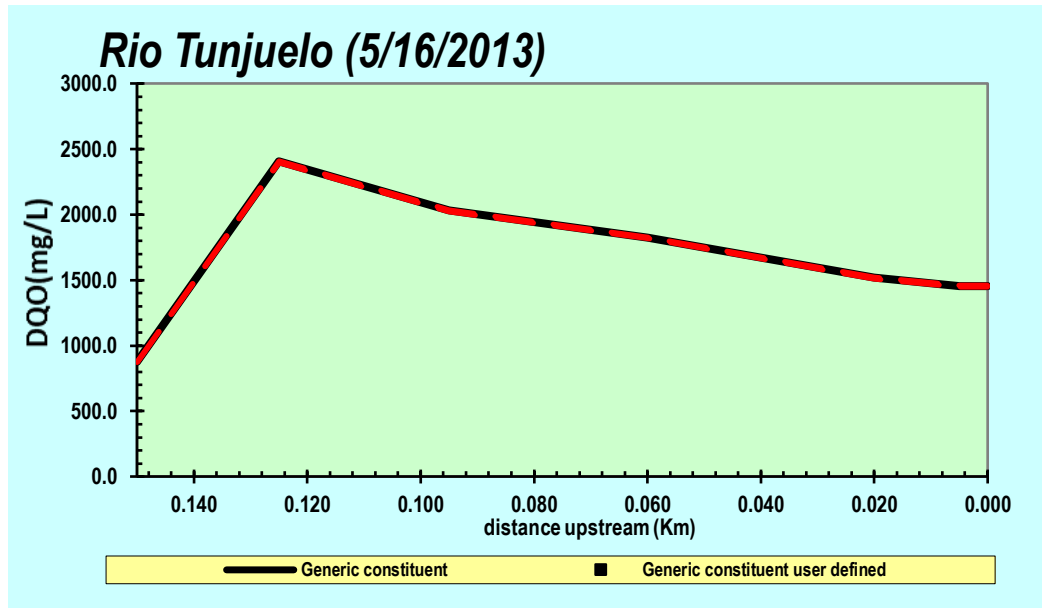
La clasificación del nitrógeno total orgánico durante todo este escenario es de “Concentraciones alta” (*Tchobanoglous, Burton y Stensel, 2003*). Respecto al escenario 3, que tiene una concentración en el punto de vertimiento de 80 mg/L, aquí se observa que se alcanzan más de 170 mg/L, lo que significa un aumento importante de la concentración del nitrógeno total orgánico, lo que perjudica al río mucho más ya que su calidad disminuye al verter un lixiviado con una calidad peor.

El pH en este escenario es ácido, y cumple dentro de la normatividad dada por la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006, donde los límites establecidos están entre 4.5 y 9, para este tipo de cuerpos de agua.

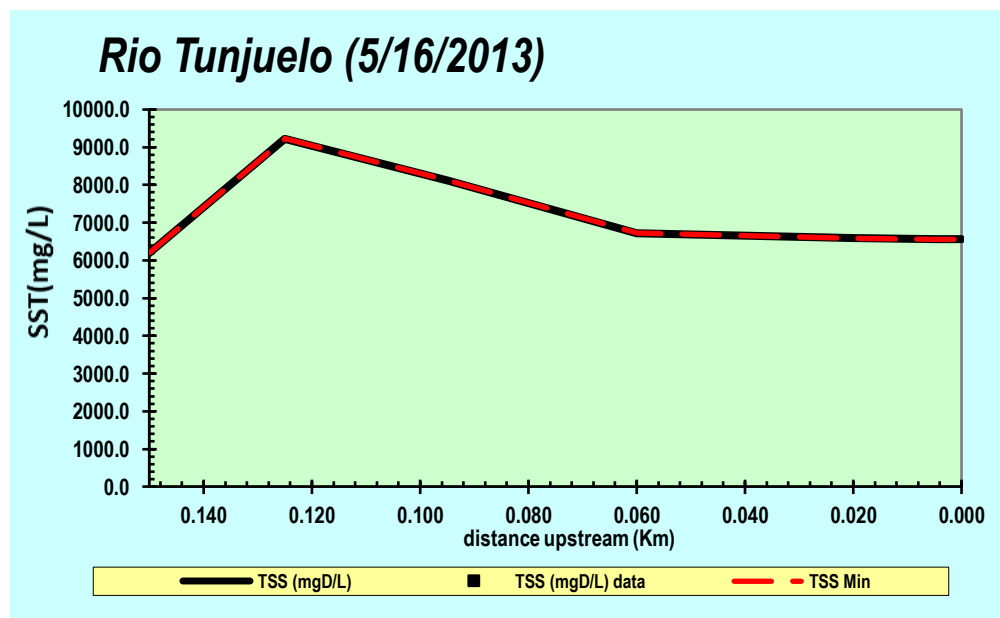


Gráfica 65. pH obtenido de Qual2k. Escenario 6

La gráfica 66 muestra la concentración de la DQO para este escenario, en esta gráfica se ve un punto máximo de 2400 mg/L en el punto de vertimiento y un valor de 1450 mg/L en el punto final del tramo en estudio, lo que clasifica al río como fuertemente contaminada (Sánchez, 2007). En el escenario 3, incluso con concentraciones más bajas en el lixiviado vertido ya se contaba con esta clasificación, debido a que el caudal con el que viene el río para estos dos escenarios, 3 y 6, es considerablemente pequeño, lo que genera aumento en las concentraciones de todos los parámetros aquí evaluados.



Gráfica 66. DQO obtenido de Qual2k. Escenario 6



Gráfica 67. SST obtenido de Qual2k. Escenario 6

En la gráfica 67 se presenta el parámetro de SST, allí se encuentra que se alcanzan valores pico de 9220 mg/L en el punto de vertimiento y posterior a éste, el río llega 6550 mg/L; valores que son considerablemente mayores a los encontrados en el escenario 3, donde se encontraba un valor en el vertimiento de 7700 mg/L. Para estos valores obtenidos en este escenario se encuentra que ambos exceden el límite permitido para el agua Clase IV, dada por la resolución 3956 de 2009 que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Una vez comparadas las condiciones teóricas con las comprobadas in situ, en lo referente a la longitud requerida sobre el cuerpo de agua para que se produzca la mezcla completa del vertimiento de lixiviados provenientes del relleno Sanitario con el río Tunjuelo, el dato obtenido con los resultados en campo es de 50 metros aproximadamente y teóricamente al usar la fórmula de Fischer se obtiene una longitud de 41.63 metros, con lo anterior se demuestra una afinidad entre los datos teóricos y los tomados en campo.

A partir de los resultados obtenidos en este proyecto, el impacto identificado en el río Tunjuelo, debido al vertimiento asociado al efluente de lixiviado tratado, generado por el Relleno Sanitario Doña Juana, es marginal en lo que los parámetros NO conservativos evaluados se refiere. Lo anterior se evidencia a partir de los resultados obtenidos en labores de campo y simulaciones, al encontrar que aproximadamente a los 100 metros aguas abajo del sitio de la descarga del vertimiento y sin mayor correlación con el caudal presente en el cuerpo receptor, los parámetros de calidad evaluados retornan a su condición de frontera antes de recibir el vertimiento.

La selección de las horas y de los puntos representativos demarcados en el río Tunjuelo, permitieron identificar con claridad el comportamiento de los parámetros de calidad evaluados del lixiviado vertido en el río, donde se logra identificar el aumento de la carga contaminante debido al ingreso del lixiviado y posteriormente un decaimiento de la concentración de éstos hasta su estabilización.

Al analizar los resultados obtenidos, se concluye que a pesar de que las condiciones hidrológicas y climatológicas variaron durante los días de muestreo, los resultados de los parámetros, conductividad, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, nitrógeno total orgánico, DBO₅ y DQO, muestran una tendencia similar en su comportamiento.

Los resultados de los parámetros no conservativos evaluados en este trabajo evidenciados en los escenarios de modelación (2 y 3), determinan que para condiciones de caudal medio y caudal bajo los niveles de contaminación en el río aumentan y clasifican al cuerpo receptor como “fuente contaminada” y “fuente fuertemente contaminada” respectivamente. Sin embargo esto se debe principalmente influenciado por las características que presenta el río aguas arriba del vertimiento y no solamente debido a la descarga de lixiviados vertidos por el Relleno Sanitario Doña Juana al río Tunjuelo.

Respecto a las normas vigentes (Resolución 3956 de 2009 en la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital y que refiere al Acuerdo CAR 43 de 2006) que rigen los objetivos de calidad del río Tunjuelo en dicho sector, se identificó que:

- Para una situación actual de funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados.
 - DBO₅ : Se encuentra que para los escenarios de caudal máximo y caudal medio, el límite exigido por el Acuerdo se cumple, y para el caudal mínimo este valor no se cumple, sin embargo, cabe aclarar que antes de recibir el vertimiento de lixiviados el Río Tunjuelo tampoco cumple con el límite de 50 mg/L.
 - pH: Se encuentra que para los 3 escenarios de caudal, máximo medio y mínimo, el parámetro está dentro del rango de valores que se establece en el Acuerdo CAR 043 de 2006.
 - Sólidos suspendidos totales: Se encuentra que para los 3 escenarios no se cumple con el límite exigido por el Acuerdo. Sin embargo se evidencia que este parámetro está por encima del límite máximo permisible, antes del vertimiento.

- Para una situación donde el lixiviado no se trate en la planta de tratamiento de lixiviados y se mantenga el caudal de vertimiento.
 - DBO₅: Se encuentra que para el escenario 4, caudal máximo, se alcanza a cumplir con el límite establecido; para los escenarios 5 y 6 ya no se logra cumplir con el límite dado por el acuerdo que es de 50 mg/L.
 - pH: Se encuentra que para el escenario 4 no alcanza a cumplir con el límite establecido, para el escenario 5 y 6 éste alcanza a cumplir con el rango establecido en el Acuerdo.
 - Sólidos suspendidos totales: Se encuentra que para los escenarios 4, 5 y 6 no se cumple con el límite exigido por el acuerdo, y de la misma manera como para los tres primeros escenarios se encuentra que este requisito tampoco se cumple antes de recibir el vertimiento.

Teniendo en cuenta los alcances realizados y las conclusiones mencionadas, se recomienda que en un futuro próximo se realicen actividades adicionales que permitan enriquecer los resultados obtenidos:

- Realizar una mayor cantidad de muestreos durante periodos continuos que abarquen diferentes condiciones climáticas, con el fin de obtener una base estadística que permita, para distintos escenarios de caudal que transporte el río, determinar y validar los comportamientos de los parámetros sobre el cuerpo de agua.

- Es importante que se evalúen no sólo los parámetros estudiados en este proyecto (Demanda Biológica de Oxígeno “DBO”, Demanda Química de Oxígeno “DQO”, Sólidos Suspendidos Totales “SST”, Sólidos

Suspendidos Volátiles “SSV” y Nitrógeno total orgánico) sino también **parámetros conservativos**, que permitan complementar y ampliar el panorama mostrado en el sector de estudio del río Tunjuelo por parte del vertimiento de lixiviados.

Referencias Bibliográficas.

Acuerdo Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) 43 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*”. Colombia.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2012). *Sistema de Evaluación Integral Para la Calidad Educativa – SEICE. Localidad de Ciudad Bolívar*. Colombia.

American Water Works Association (AWWA), American Public Health Association (APHA), and Water Environment Federation (WEF). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22th ed.

Arce Velázquez, Ana Luisa. (2013). *Muestreo y Preservación de Grasas y Aceites, y Determinación en campo de pH, Temperatura y Materia Flotante*. México: Comisión Nacional del Agua.

Betancur Grajales, Ramiro. (2003). *Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Bureau Veritas. (2008). *Manual para la Formación en Medio Ambiente*. España: Lex Nova.

Campos Aranda, Daniel. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Castillo, Jorge, y Carlos Espinoza. (2005). *Modelo de Simulación para la Calidad de Agua en un Río*. Chile: Universidad de Chile.

- Cervantes Nemer, Beatriz Virginia. (2009). *Manual pedagógico de prácticas de química general en micro escala*. México: Universidad Iberoamericana A.C.
- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Waveland Pr Inc.
- Consortio HERA NAM VELZEA. (2003). *Máxima capacidad de tratamiento del S.T.L. en condiciones de operación que superan las cargas de diseño*.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2009). *Modelación Hidráulica río Tunjuelo*. Colombia.
- Fernández Gonzales, Jesús, y María Dolores Curt. (2004). *Manual de Fito depuración. Filtros de Macrofitas en Flotación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería ambiental*. Pearson Educación.
- IDEAM- Laboratorio de Calidad Ambiental. (2007). *Ficha Técnica Sistema de Información del Medio Ambiente*.
- Jiménez Cisneros, Blanca Elena. (2005). *La contaminación ambiental en México*. México: Umusa, S.A.
- Kormondy, Edward John. (1969). *Concepts of ecology*. Prentice Hall.
- Marín Galvín, Rafael. (2003). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. Madrid: Díaz de Santos.
- Massol, Arturo. (2002). *Manual de Laboratorios Ecología de Microorganismos*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.

- Monerri, Miguel Martin, y Paula Marzal Doménech. (2001). *Modelación de la calidad de agua*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ortega-Gaucin, David. (2012). *Hidrometría Básica Aplicada a la Operación de Distritos Y Unidades de Riego*. México: Instituto del Agua de Nuevo León.
- Osorio, J. A. (2008). *La Historia del agua en Bogotá: Una Exploración Bibliográfica sobre la Cuenca del Rio Tunjuelo, en el Siglo XX*. Colombia: Memoria y Sociedad 12, No.25.
- Pontificia Universidad Javeriana. (2010). *Evaluación de los Parámetros de Calidad exigidos por la Autoridad Ambiental, para el Vertimiento del Efluente de la Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana*. Colombia.
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) – 2000. *Sección ii. Título E: Tratamiento de Aguas Residuales*. Colombia: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Resolución 3956 de 2009, Secretaria de ambiente. “Por la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital”. Colombia.
- Sainz Sastre, Juan Antonio. (2007). *Tecnologías para la sostenibilidad*. Madrid: Fundación EOI.
- Sánchez, Oscar. (2007). *Perspectivas Sobre Conservación de Ecosistemas Acuáticos en México*. México: Instituto Nacional de Ecología.

- Secretaria Distrital De Ambiente. (2007). *Diagnóstico POMCA Tunjuelo*. Secretaria Distrital de Ambiente. Bogotá.
- Starr, Cecie, y Ralph Taggart. (2008). *Biología: La unidad y la diversidad de la vida*. México: Cenage Learning Editors.
- Tchobanoglous, George, Franklin L. Burton, y H. David Stensel. (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. 4th Ed. New York: Mc Graw Hill Companies, Inc.
- UAESP. (2010, 2011). Plan de Choque
- Vente Chow. (1982). *Hidráulica de los canales abiertos*. Japon: Mc Graw-Hill.
- WRDMAP. (2010). *Advisory Note 1.5: Use of Qual2K Water Quality Model in IWRM Planning*. China-UK: Department for International Development (DFID).

Anexos.

ANEXO: MEDICIONES DE VELOCIDADES EN CAMPO

Campaña 1 de Abril		
Distancia	5	m
Analisis Lateral del Rio		
Medicion		1
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
12.1	13.7	0.364
13.2		
13.4		
16.2		
Medicion		2
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.1	14.3	0.351
13.9		
14.6		
15.4		
Medicion		3
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.4	14.0	0.357
13.6		
14.3		
14.7		
Medicion		4
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
12.7	13.6	0.368
12.9		
13.8		
14.9		
Medicion		5
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.5	14.5	0.346
14.2		
14.7		
15.4		
Medicion		6
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.3	15.0	0.334
13.6		
15.8		
17.2		

Campaña 1 de Abril		
Distancia	5	m
Analisis Central del Rio		
Medicion		1
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
8.6	9.5	0.529
10.3		
Medicion		2
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
9.3	10.0	0.502
9.9		
10.7		
Medicion		3
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
9.5	10.1	0.498
9.7		
10.2		
10.8		
Medicion		4
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
9.2	9.8	0.512
9.5		
10.6		

Campaña 8 de Abril del 2013

Campaña 8 de Abril					
Distancia	5	m			
Análisis Lateral del Río					
Medición		1	Medición		6
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
12.4	14.7	0.341	12.7	16.6	0.301
12.8			16.7		
13.5			17.4		
19.9			19.7		
Medición		2	Medición		7
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
11.7	13.1	0.382	13.3	13.8	0.361
13.3			13.5		
13.5			14.7		
13.8					
Medición		3	Medición		8
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.8	16.3	0.393	15	15.0	0.333
16.2					
17.3					
17.9					
Medición		4	Medición		9
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.2	13.7	0.330	10.5	15.1	0.332
14.2			13.6		
			16.8		
			19.3		
Medición		5	Medición		10
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
12.5	13.2	0.379	11.8	12.3	0.408
13.1			12.3		
14			12.7		

Analisis Central del Rio					
Medicion		1	Medicion		5
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
9.6	11.1	0.449	8.5	8.8	0.570
9.8			8.6		
12.1			8.7		
13			9.3		
Medicion		2	Medicion		6
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
8.4	9.8	0.509	7.9	8.8	0.567
9.9			8.4		
10.3			9.1		
10.7			9.9		
Medicion		3	Medicion		7
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
10.2	11.9	0.422	7.7	9.2	0.543
10.5			8.2		
10.9			9.3		
15.8			11.6		
Medicion		4	Medicion		8
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
9	9.6	0.519	9.9	10.7	0.466
9.1			11		
10.1			11.3		
10.3					

Campaña 15 de Abril del 2013.

Campaña 15 de Abril					
Distancia	5	m			
Análisis Lateral del Río					
Medición		1			
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)			
15.5	15.7	0.318			
15.7					
16					
Medición		2	Medición		7
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
16	16.0	0.313	13.5	15.0	0.334
			14.5		
			15.6		
			16.2		
Medición		3	Medición		8
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.4	13.6	0.369	11.3	12.7	0.393
13.7			13.1		
			13.8		
Medición		4	Medición		9
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.9	14.2	0.353	12.3	14.7	0.340
14			17.1		
14.6					
Medición		5	Medición		10
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
13.4	13.7	0.364	12.1	13.3	0.375
13.6			13		
14.2			14.9		
Medición		6	Medición		11
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
12.4	13.6	0.368	12.9	15.2	0.330
12.5			17.4		
15.9					

Analisis Central del Rio					
Medicion		1	Medicion		6
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
7.9	8.5	0.586	6.1	7.6	0.660
8.4			6.7		
9.3			7.1		
			10.4		
Medicion		2	Medicion		7
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
6.5	7.9	0.630	5.1	7.8	0.641
7.3			7.4		
10			8.8		
			9.9		
Medicion		3	Medicion		8
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
6.9	8.5	0.592	5.6	7.7	0.654
10			9.7		
Medicion		4	Medicion		9
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.9	7.9	0.633	5.3	8.2	0.612
8.7			7.7		
9.1			11.5		
Medicion		5	Medicion		10
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.7	7.5	0.669	6.1	7.5	0.671
6.6			7		
8.2			7.7		
9.4			9		

Campaña 22 de Abril del 2013.

Campaña 22 de Abril					
Distancia	5		m		
Análisis Lateral del Río					
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
6	6.4	0.777	5.6	5.9	0.847
6.5			6.2		
6.8					
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.2	6.2	0.803	5.1	5.8	0.867
5.9			5.6		
6.5			6.6		
7.3					
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
4.8	6.1	0.820	5.8	6.2	0.803
6.1			6		
6.3			6.4		
7.2			6.7		
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.5	6.0	0.840	5.4	5.8	0.870
5.7			5.5		
5.8			5.9		
6.8			6.2		
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.4	6.1	0.823	5.2	5.7	0.877
5.6			6.2		
6.2					
7.1					
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
5.2	5.7	0.877	4.9	5.8	0.870
5.3			5.3		
5.8			6		
6.5			6.8		
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
4.2	5.8	0.862	5.2	6.4	0.785
7.4			6.3		
			7.6		
Medición			Medición		
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
6.1	6.3	0.800	5.9	6.0	0.833
6.4			6.1		

Analisis Central del Rio					
Medicion		1	Medicion		8
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
4.2	4.4	1.145	3.9	4.2	1.190
4.4			4.2		
4.5			4.5		
Medicion		2	Medicion		9
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
2.7	3.7	1.364	3.4	3.9	1.293
3.8			3.8		
4.5			4.4		
Medicion		3	Medicion		10
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
4.6	5.0	1.007	3.5	4.0	1.250
5			3.9		
5.3			4.6		
Medicion		4	Medicion		11
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
3.8	4.7	1.056	3.4	4.5	1.111
5.1			4.9		
5.3			5.2		
Medicion		5	Medicion		12
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
3.4	4.0	1.240	3.1	3.7	1.339
4.1			3.8		
4.6			4.3		
Medicion		6	Medicion		13
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
4.4	4.6	1.087	3.8	4.3	1.163
4.8			4.3		
			4.8		
Medicion		7	Medicion		14
<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)	<i>t(s)</i>	<i>t(s) prom</i>	V(m/s)
3.8	4.1	1.230	3.7	4.0	1.261
4			4		
4.4			4.2		

ANEXO: RESULTADOS DE MEDICIONES DE PARAMETROS DE CAMPO

Campañas	Sub campañas	Conductividad (µs/cm)	pH	T(°C)	SDT (mg/L)
1 de Abril 2013	1	264.70	10.5	13.5	
		189.20	8.1	29.6	
		7090.00	7.9	23.7	
		10350.00	7.9	25.6	
		7070.00	8.3	24.7	
		7040.00	8.4	20.5	
		8420.00	8.2	19.3	
		4110.00	8.8	18.4	
		4560.00	8.5	17.8	
		2700.00	8.5	16.5	
		2500.00	8.7	16.2	
	2	295.10	9.8	13.8	
		171.70	9.5	13.8	
		156.20	9.3	13.8	
		143.60	9.0	13.8	
		141.00	8.8	13.9	
		120.50	7.7	13.6	
		17700.00	8.0	27.4	
		18500.00	8.0	27.5	
		15490.00	8.1	27.1	
		8230.00	8.2	20.8	
		9100.00	8.2	23.6	
		8540.00	8.0	24.0	
		10900.00	8.0	21.4	
		5600.00	8.2	18.4	
		6730.00	8.2	19.6	
		5740.00	8.4	19.2	
		3	381.20	9.0	16.3
	380.30		9.1	15.4	0.314
	300.40		8.8	15.4	0.301
	297.00		8.2	15.4	0.287
	351.80		8.5	16.5	0.206
	19400.00		8.0	29.4	11.020
	19320.00		8.0	30.2	11.700
	19260.00		8.0	29.1	11.420
	13450.00		8.2	28.5	9.120
	11430.00		8.0	25.7	4.120
	8500.00		8.1	23.7	7.700

Campañas		Conductividad (µs/cm)	pH	T(°C)	SDT (mg/L)	
1 de Abril 2013		13870.00	8.1	24.9	5.700	
		2590.00	8.5	18.2	4.060	
		2580.00	8.3	15.6	6.700	
	4		415.00	8.2	16.1	0.302
			409.70	7.6	15.8	0.261
			341.30	7.8	16.1	0.293
			19330.00	7.9	39.6	11.520
			16910.00	8.3	28.5	8.260
			12350.00	8.0	28.4	6.700
			10700.00	8.1	29.1	8.120
			10470.00	8.1	26.2	7.400
			1950.00	8.1	22.6	4.230
			9500.00	8.1	21.3	5.130
			9230.00	8.1	21.1	6.110
			8770.00	8.2	20.6	5.760
8 de Abril 2013	5	191.10	9.5	16.6	0.147	
		189.90	9.6	16.4	0.148	
		8790.00	8.2	22.3	5.100	
		5700.00	8.2	24.2	3.700	
		5860.00	8.3	21.5	3.410	
		3505.00	8.3	18.3	3.910	
		2500.00	8.1	18.6	2.840	
		3781.00	8.2	18.9	3.002	
		362.10	7.8	16.2	0.285	
	6	183.15	9.1	16.7	0.138	
		181.30	9.5	16.4	0.141	
		9860.00	8.2	22.6	7.410	
		5100.00	8.1	23.4	4.789	
		6480.00	8.2	21.1	4.120	
		3680.00	8.3	18.6	3.530	
		2860.00	8.1	18.4	2.490	
		3890.00	8.1	18.7	2.891	
		363.20	7.9	17.1	0.346	
	7	164.00	8.2	16.5	0.128	
		165.70	8.1	16.3	0.130	
		19070.00	8.1	29.4	11.510	
		8010.00	8.2	20.7	3.700	
		4238.00	8.2	17.9	2.587	
		5940.00	8.3	15.5	3.470	
3556.00		8.3	16.9	2.583		

Campañas		Conductividad (µs/cm)	pH	T(°C)	SDT (mg/L)	
8 de Abril 2013		4804.00	8.5	19.4	2.134	
		364.90	8.9	17.3	0.584	
	8		146.10	7.3	17.8	0.110
			142.50	6.8	17.2	0.110
			19100.00	8.0	28.7	12.730
			15260.00	7.8	25.6	8.890
			5320.00	8.0	19.3	6.690
			5540.00	7.9	19.1	4.600
			4102.00	7.7	18.9	2.345
			4810.00	7.8	20.9	7.810
			270.70	6.8	17.0	0.219
		9		152.00	6.7	17.0
			180.60	6.6	16.9	0.118
			19020.00	7.9	29.0	12.200
			12650.00	8.0	24.3	7.250
			6420.00	8.1	22.0	6.190
			7400.00	7.9	21.6	5.940
			3300.00	7.8	19.4	6.170
			1932.00	7.8	19.2	2.675
			232.70	7.8	17.0	0.270
	10		149.23	6.8	16.9	0.108
			173.40	6.7	16.4	0.119
			18300.00	8.0	28.4	13.450
			11789.00	9.1	26.4	8.344
			5456.00	7.9	23.6	6.890
			7896.00	7.7	22.4	5.770
			3490.00	7.9	20.9	7.890
			2650.00	7.7	19.8	2.689
			243.21	7.9	17.6	0.241
	15 de Abril 2013	11	186.40	8.0	15.6	0.186
189.90			8.4	15.3	0.164	
18400.00			7.5	30.8	12.170	
8127.00			7.7	27.1	10.410	
6431.00			7.8	26.2	8.710	
2793.00			7.9	19.1	3.640	
1994.00			7.9	18.6	1.920	
1986.00			8.1	17.9	1.840	
297.60			8.0	17.6	1.730	
491.00			8.3	17.5	1.160	
158.10			8.1	17.6	0.993	

Campañas		Conductividad (µs/cm)	pH	T(°C)	SDT (mg/L)
15 de Abril 2013		90.03	7.9	17.4	0.873
		310.80	7.6	17.1	0.610
		326.40	8.0	17.0	0.539
		358.30	8.2	16.5	0.578
		373.50	8.1	15.8	0.521
		370.40	7.9	15.2	0.546
		366.80	7.9	15.3	0.512
	12	196.50	8.6	15.3	0.157
		196.40	8.1	15.2	0.163
		19700.00	7.2	31.3	11.350
		3746.00	7.0	20.2	7.567
		7910.00	7.2	22.0	5.320
		2888.00	7.9	18.0	1.336
		1877.00	8.1	16.9	1.590
		1823.00	8.1	17.0	1.520
		224.10	7.6	16.9	1.506
		594.10	7.7	17.2	1.586
		124.63	7.8	16.7	0.951
		83.12	8.2	16.8	0.986
		231.40	8.0	15.7	0.236
		351.40	7.8	16.0	0.546
		301.60	7.6	16.9	0.531
		296.80	8.3	15.8	0.542
		290.70	8.3	15.3	0.601
		299.10	8.3	15.6	0.538
	13	245.60	8.2	16.4	0.194
		281.40	8.1	16.6	0.205
		20200.00	8.0	30.1	12.080
		8721.00	8.3	28.7	5.631
		5413.00	8.3	28.3	3.951
		3962.00	8.4	27.2	3.137
		2739.00	8.4	25.4	1.901
		1663.00	8.4	25.1	1.647
	178.20	8.6	20.3	1.950	
	246.90	8.5	20.4	2.304	
	194.00	8.4	20.1	1.080	
	101.30	8.4	20.0	0.932	
	273.90	8.4	19.7	0.762	
	296.70	8.3	18.5	0.014	
	299.10	8.0	18.7	0.689	

Campañas		Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	T($^{\circ}\text{C}$)	SDT (mg/L)
15 de Abril 2013		310.50	8.1	18.3	0.513
		313.20	8.1	17.5	0.525
		309.30	8.0	16.9	0.509
	14	278.20	6.9	16.9	0.213
		288.90	7.0	16.9	0.221
		18490.00	7.5	29.8	11.020
		6360.00	8.0	22.0	4.498
		4138.00	8.1	19.9	2.540
		3449.00	8.1	19.5	2.697
		3978.00	8.0	20.4	3.159
		3543.00	8.1	19.6	1.476
		221.00	8.2	18.2	1.663
		483.10	8.1	17.3	0.692
		342.30	7.9	17.3	0.679
		152.30	7.9	17.8	0.582
		247.50	7.8	16.9	0.750
		261.90	7.8	17.4	0.787
		321.20	7.9	17.4	0.648
		301.70	7.9	16.9	0.539
		294.20	8.0	16.6	0.521
		304.60	8.0	16.5	0.512
	15	295.60	6.8	17.2	0.231
		301.30	6.7	16.7	0.246
		18760.00	8.3	29.7	13.120
		7132.00	8.7	21.1	8.123
		4898.00	8.8	19.3	5.072
		4132.00	8.5	19.4	3.582
		4120.00	8.3	19.8	3.218
		3743.00	8.6	19.4	2.670
		316.00	8.3	19.7	2.240
		1432.00	8.5	18.6	2.178
		1172.00	8.6	18.7	1.964
		174.50	8.6	17.2	1.034
	190.70	8.7	16.5	0.846	
	285.60	8.3	17.2	0.789	
	272.90	8.1	17.3	0.683	
	294.70	8.0	16.3	0.541	
	287.90	8.0	17.0	0.589	
	299.20	7.9	17.3	0.511	

Campañas		Conductividad (µs/cm)	pH	T(°C)	SDT (mg/L)
22 de Abril 2013	16	24.70	6.9	13.5	0.021
		24.90	6.7	13.6	0.021
		1158.00	7.8	14.7	1.494
		200.40	7.9	13.8	0.205
		236.80	7.9	13.8	0.195
		218.20	8.0	14.0	0.166
		219.20	7.9	13.9	0.166
		229.60	7.9	13.9	0.428
		128.10	7.6	13.9	0.086
		131.80	7.4	14.0	0.095
		122.10	7.3	14.1	0.079
		106.90	7.3	14.1	0.069
		101.40	7.3	14.2	0.058
		95.90	7.3	14.1	0.059
		93.30	7.3	14.3	0.058
		92.40	7.3	14.3	0.058
	91.80	7.3	14.1	0.057	
	92.30	7.3	14.2	0.057	
	17	34.10	7.1	14.8	0.022
		1083.00	7.9	15.3	1.301
		245.00	7.8	14.5	0.200
		121.20	7.3	14.5	0.984
		99.70	7.3	14.4	0.081
	18	36.60	7.3	14.9	0.024
		1091.00	7.9	15.1	1.071
		270.40	7.8	14.9	0.175
		134.40	7.3	14.8	0.099
		91.50	7.2	14.8	0.060
	19	35.80	7.2	15.0	0.023
		1650.00	7.9	15.8	1.064
		300.40	7.8	15.2	0.195
		180.30	7.3	15.1	0.119
		124.20	7.3	15.0	0.083
	20	26.50	7.2	14.8	0.034
		25.30	7.3	14.7	0.034
		1256.00	7.8	15.6	1.160
		201.60	7.8	15.5	0.645
		230.40	7.8	15.3	0.215
		210.80	7.8	15.3	0.189
		219.10	7.8	15.3	0.168

Campañas		Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	T($^{\circ}\text{C}$)	SDT (mg/L)
22 de Abril 2013		220.50	7.7	15.2	0.159
		140.50	7.6	15.2	0.152
		141.50	7.5	15.1	0.148
		135.60	7.5	15.1	0.140
		126.90	7.4	15.2	0.136
		126.40	7.3	15.1	0.131
		123.10	7.3	15.2	0.127
		128.60	7.3	15.2	0.114
		126.40	7.4	15.3	0.093
		124.60	7.3	15.3	0.094
		123.90	7.3	15.3	0.093

ANEXO: RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.

Muestra	Abscisa(m)	pH	Conductividad(μs/cm)	T(°C)	DQO(mg/L)	SST(mg/L)	SSV(mg/L)	NTO(mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
E061-13-1	-10	6.46	31.5	21.3	24.2	256	32	1.96	5.6 5.1 4.2	5.0
E061-13-2	0	8.33	1147	21.4	227.3	288.0	62.0	3.92	30.3 23.8 21.2	25.1
E061-13-3	10	7.63	296.2	21.5	33.9	238.0	34.0	2.24	8.3 6.8 6.7	7.3
E061-13-4	60	7.21	148.6	21.5	72.5	242.0	34.0	1.96	9.8 7.7 6.8	8.1
E061-13-5	90	7.02	122.2	21.6	14.5	268.0	36.0	1.68	5.4 4.6 4.5	4.8
E061-13-6	-10	6.58	36.6	21.7	38.7	196	28	1.68	7.4 6.8 6.2	6.8
E061-13-7	0	8.17	1165	22.1	120.9	392	64	8.12	29.8 23.7 21.5	25.0
E061-13-8	10	7.64	264.8	22.3	55.1	324	40	2.8	9.1 9.5 8.9	9.2
E061-13-9	60	7.02	128.8	22.5	84.1	386	36	2.52	10.8 9.5 9.8	10.0
E061-13-10	90	6.91	87.3	22.1	29.0	262	28	2.52	7.1 5.7 5.5	6.1
E061-13-11	-10	6.63	34.9	22.2	58.0	406	40	1.96	9.4 9.2 7.7	8.7
E061-13-12	0	8.43	1403	22.2	159.6	274	44	8.4	29.1 25.8 20.4	25.1
E061-13-13	10	7.78	307.4	22.3	29.0	236	34	3.08	7.1 7.3 6.5	7.0
E061-13-14	60	7.4	182.2	22.4	167.3	300	44	2.8	23.1 16.4 16.5	18.7
E061-13-15	90	7.18	123.3	22.5	24.2	314	42	1.96	6.6 5.6 5.2	5.8