

EVALUACIÓN DE LA AFECTACIÓN DEL RÍO BOGOTÁ CAUSADA POR EL
VERTIMIENTO GENERADO EN UN PROCESO DE CURTIDO DE PIELES,
TRAMO VILLAPINZÓN – RÍO TEJAR

JUAN FELIPE SOTO MOYA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN DE LA AFECTACIÓN DEL RÍO BOGOTÁ CAUSADA POR EL
VERTIMIENTO GENERADO EN UN PROCESO DE CURTIDO DE PIELES,
TRAMO VILLAPINZÓN – RÍO TEJAR

JUAN FELIPE SOTO MOYA

Proyecto de Investigación para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO

Director
DIANA MARCELA CUESTA PARRA
Ingeniera Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

Nota De Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C. Junio, 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Investigación

Dr. Manuel Cancelado Jiménez

Director Programa Ingeniería

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

“Ningún hombre puede ser llamado educado, si no tiene una buena voluntad, un deseo y una capacidad entrenada para hacer su parte en el trabajo del mundo”.

Robert Stephenson Smyth Baden-Powell.

A Dios como mi principal fuente de inspiración y motivación. A mi mamá Inés Moya Molina y mi hermano Jorge Andrés Soto Moya quienes, a pesar de la distancia, siempre se esforzaron por darme las herramientas, ánimos, consejos, y motivos para hacer realidad este sueño de ser Ingeniero Químico. A todos quienes de una u otra manera aportaron su granito de arena para ayudarme a culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Diana Marcela Cuesta Parra por su infinita paciencia, por compartir sus conocimientos desde su experiencia profesional y por su destacada asesoría para llevar a cabo este proyecto de manera exitosa, contribuyendo a mi formación como profesional.

Al Ingeniero Jaime Eduardo Arturo Calvache por su constante disposición y acompañamiento desde su formación profesional para llevar a cabo este proyecto y también por darme la oportunidad de desarrollar la modelación de la calidad del agua, como un reto para mi formación como Ingeniero Químico.

A todos los docentes que hacen parte del Grupo de Investigación en Procesos de Separación No Convencionales de la Fundación Universidad de América, por sus siempre oportunos comentarios y sugerencias, que llevaron por buen camino la planeación, puesta en marcha y ejecución de este proyecto. Y a todos los demás profesionales que laboran en nuestra *Alma Máter* que aportaron su granito de arena para hacer posible este logro.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 21 |
| OBJETIVOS | 23 |
| 1. GENERALIDADES | 24 |
| 1.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA | 24 |
| 1.1.1 El agua superficial | 26 |
| 1.1.2 Canal abierto | 27 |
| 1.2 PROCESO DE UNA CURTIEMBRE | 27 |
| 1.2.1 Primera etapa, ribera | 28 |
| 1.2.2 Segunda etapa, proceso de curtido | 31 |
| 1.2.2.1 Curtido al cromo | 32 |
| 1.2.2.2 Curtido vegetal | 34 |
| 1.2.3 Tercera etapa, recurtido | 37 |
| 1.2.3.1 Acabado en húmedo para cueros curtidos al cromo | 37 |
| 1.2.3.2 Acabado en húmedo para cueros curtidos por curtido vegetal | 39 |
| 1.2.4 Cuarta etapa, acabado | 41 |
| 1.3 NORMATIVIDAD | 45 |
| 1.3.1 Decreto 3930 de 2010 | 45 |
| 1.3.2 Resolución 0631 de 2015 | 46 |
| 1.3.3 Acuerdo 043 de 2006 | 47 |
| 1.4 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA | 48 |
| 1.4.1 Conductividad eléctrica | 48 |
| 1.4.2 Cromo total | 49 |
| 1.4.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO ₅ | 49 |
| 1.4.4 Oxígeno Disuelto – OD | 49 |
| 1.4.5 pH | 50 |
| 1.4.6 Sólidos Suspendidos Totales – SST | 50 |
| 1.4.7 Temperatura | 50 |
| 1.5 CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA | 51 |
| 1.6 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES – P.T.A.R.I. | 52 |
| 1.6.1 Pozo de recepción | 52 |
| 1.6.2 Tanque de oxidación catalítica | 52 |
| 1.6.3 Homogeneización | 53 |
| 1.6.4 Tratamiento primario | 53 |
| 1.6.5 Tratamiento secundario | 53 |
| 2. SELECCIÓN DE VARIABLES | 56 |
| 2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE VARIABLES | 56 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.1.1 | Técnicos | 56 |
| 2.1.2 | Normativos | 56 |
| 2.1.3 | Procedimentales | 56 |
| 2.2 | RED DE MONITOREO DEL RÍO BOGOTÁ | 57 |
| 2.2.1 | Aguas arriba Villapinzón | 58 |
| 2.2.2 | Río Tejar | 58 |
| 2.3 | RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN | 59 |
| 2.3.1 | Calidad del agua del receptor | 60 |
| 2.3.2 | Calidad del agua del proceso | 62 |
| 3. | MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA | 64 |
| 3.1 | DEFINICIÓN DE MODELO DE CALIDAD DEL AGUA | 64 |
| 3.2 | CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA | 65 |
| 3.2.1 | Según la fuente superficial de agua | 65 |
| 3.2.2 | Según sus propósitos, limitaciones y especificaciones | 66 |
| 3.2.3 | Según su proceso de modelación | 67 |
| 3.2.4 | Según su tipo de datos | 68 |
| 3.2.5 | Según su variación con respecto al tiempo. | 68 |
| 3.2.6 | Según sus dimensiones | 69 |
| 3.2.6.1 | Modelos adimensionales | 69 |
| 3.2.6.2 | Modelos unidimensionales | 69 |
| 3.2.6.3 | Modelos bidimensionales | 69 |
| 3.2.6.4 | Modelos tridimensionales | 70 |
| 3.2.7 | Según su disponibilidad | 70 |
| 3.3 | SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA | 70 |
| 3.3.1 | Matriz de selección | 70 |
| 3.3.2 | Criterios de selección | 71 |
| 3.3.2.1 | Importancia | 71 |
| 3.3.2.2 | Costo | 71 |
| 3.3.2.3 | Dimensiones | 71 |
| 3.3.2.4 | Manual del usuario y soporte | 72 |
| 3.3.2.5 | Parámetros modelados | 72 |
| 3.3.2.6 | Precisión | 72 |
| 3.3.2.7 | Referentes bibliográficos | 72 |
| 3.3.2.8 | Uso del modelo | 72 |
| 3.3.2.9 | Variabilidad temporal | 72 |
| 3.3.3 | Resultado de la matriz de selección | 76 |
| 3.4 | QUAL2K | 78 |
| 3.4.1 | Generalidades | 78 |
| 3.4.2 | Descripción del modelo matemático | 79 |
| 3.4.2.1 | Balance de flujo | 80 |
| 3.4.2.2 | Características hidráulicas del sistema | 81 |
| 3.4.2.3 | Balance de masa | 87 |
| 3.4.2.4 | Balance de energía | 90 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4. | RESULTADOS | 94 |
| 4.1 | DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DEL MODELO | 94 |
| 4.2 | MODELACIÓN DEL IMPACTO A LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO BOGOTÁ CAUSADO POR EL VERTIMIENTO GENERADO EN UNA CURTIEMBRE | 95 |
| 4.2.1 | Simplificaciones que se tuvieron en cuenta para la modelación | 96 |
| 4.2.2 | Análisis de los resultados obtenidos por el software | 97 |
| 4.2.2.1 | Caudal | 97 |
| 4.2.2.2 | Conductividad eléctrica | 98 |
| 4.2.2.3 | Cromo total | 99 |
| 4.2.2.4 | Oxígeno Disuelto | 101 |
| 4.2.2.5 | DBO lenta | 102 |
| 4.2.2.6 | DBO rápida | 104 |
| 4.2.2.7 | Fósforo total | 105 |
| 4.2.2.8 | Nitratos | 106 |
| 4.2.2.9 | pH | 107 |
| 4.2.2.10 | Sólidos Suspendidos Totales | 109 |
| 4.2.2.11 | Sulfuros | 110 |
| 4.2.2.12 | Temperatura | 112 |
| 5. | CONCLUSIONES | 114 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 116 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 117 |
| | ANEXOS | 124 |

LISTA DE CUADROS

| | pág. |
|--|------|
| Cuadro 1. Nombre de las estaciones de monitoreo de la calidad del agua de la cuenca alta del río Bogotá. | 58 |
| Cuadro 2. Descripción de las características de los modelos de calidad del agua preseleccionados. | 73 |
| Cuadro 3. Parámetros modelados por QUAL2K y sus unidades respectivas. | 79 |
| Cuadro 4. Relación cromática de las hojas de cálculo del modelo. | 94 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|--|------|
| Ecuación 1. Caudal. | 80 |
| Ecuación 2. Balance de flujo. | 80 |
| Ecuación 3. Ecuación de Manning. | 82 |
| Ecuación 4. Ecuación de Manning para el Sistema Inglés. | 83 |
| Ecuación 5. Radio hidráulico. | 83 |
| Ecuación 6. Área mojada de un canal trapezoidal. | 84 |
| Ecuación 7. Perímetro mojado de un canal trapezoidal. | 84 |
| Ecuación 8. Ecuación de Manning utilizada por QUAL2K. | 85 |
| Ecuación 9. Cálculo iterativo de la profundidad para QUAL2K. | 85 |
| Ecuación 10. Error estimado para QUAL2K. | 85 |
| Ecuación 11. Ancho promedio del tramo. | 86 |
| Ecuación 12. Cálculo del ancho superficial del cauce. | 86 |
| Ecuación 13. Balance general de masa para cualquier parámetro físicoquímico. | 88 |
| Ecuación 14. Balance de energía para cualquier tramo. | 91 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Recorrido del río Bogotá. | 25 |
| Figura 2. Primera etapa, ribera. | 30 |
| Figura 3. Efluentes primera etapa, ribera. | 31 |
| Figura 4. Segunda etapa, proceso de curtido al cromo. | 33 |
| Figura 5. Efluentes segunda etapa, proceso de curtido al cromo. | 34 |
| Figura 6. Segunda etapa, proceso de curtido vegetal. | 36 |
| Figura 7. Efluentes segunda etapa, proceso de curtido vegetal. | 37 |
| Figura 8. Tercera etapa, recurtido para cueros curtidos al cromo. | 39 |
| Figura 9. Tercera etapa, recurtido para cueros curtidos por curtido vegetal. | 41 |
| Figura 10. Cuarta etapa, acabado. | 43 |
| Figura 11. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua. | 55 |
| Figura 12. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua. | 66 |
| Figura 13. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua segunda parte. | 68 |
| Figura 14. Elementos del balance de flujo. | 81 |
| Figura 15. Canal trapezoidal. | 83 |
| Figura 16. Algoritmo de balance de flujo y caracterización hidráulica para QUAL2K. | 87 |
| Figura 17. Balance de masa. | 89 |
| Figura 18. Balance de energía expresado en función del calor. | 92 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1. Caudal en temporada de sequía. | 97 |
| Gráfica 2. Caudal en temporada de lluvia. | 98 |
| Gráfica 3. Conductividad eléctrica en temporada de sequía. | 99 |
| Gráfica 4. Conductividad eléctrica en temporada de lluvia. | 99 |
| Gráfica 5. Cromo total en temporada de sequía. | 100 |
| Gráfica 6. Cromo total en temporada de lluvia. | 101 |
| Gráfica 7. Oxígeno Disuelto en temporada de sequía. | 102 |
| Gráfica 8. Oxígeno Disuelto en temporada de lluvia. | 102 |
| Gráfica 9. DBO lenta en temporada de sequía. | 103 |
| Gráfica 10. DBO lenta en temporada de lluvia. | 104 |
| Gráfica 11. DBO rápida en temporada de sequía. | 105 |
| Gráfica 12. DBO rápida en temporada de lluvia. | 105 |
| Gráfica 13. Fósforo total en temporada de sequía. | 106 |
| Gráfica 14. Fósforo total en temporada de lluvia. | 106 |
| Gráfica 15. Nitratos en temporada de sequía. | 107 |
| Gráfica 16. Nitratos en temporada de lluvia. | 107 |
| Gráfica 17. pH en temporada de sequía. | 108 |
| Gráfica 18. pH en temporada de lluvia. | 109 |
| Gráfica 19. Sólidos Suspendidos Totales en temporada de sequía. | 110 |
| Gráfica 20. Sólidos Suspendidos Totales en temporada de lluvia. | 110 |
| Gráfica 21. Sulfuros en temporada de sequía. | 111 |
| Gráfica 22. Sulfuros en temporada de lluvia. | 112 |
| Gráfica 23. Temperatura en temporada de sequía. | 112 |
| Gráfica 24. Temperatura en temporada de lluvia. | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Cantidad de agua residual y carga de contaminación generados por cada etapa durante el proceso de curtido de una tonelada de cuero. | 44 |
| Tabla 2. Valores límite máximos establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos provenientes del sector curtiembres. | 47 |
| Tabla 3. Valores límite máximos establecidos en el Acuerdo 043 de 2006 para vertimientos en aguas Clase II. | 48 |
| Tabla 4. Calidad del agua del río Bogotá en las estaciones de monitoreo Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar pertenecientes a la CAR Cundinamarca. | 61 |
| Tabla 5. Calidad del agua a la salida de la PTARI de la empresa a marzo de 2018. | 62 |
| Tabla 6. Resumen de la matriz de selección del modelo de calidad del agua para la simulación del impacto generado en el río Bogotá. | 77 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|---|------|
| Anexo A. Resolución 0631 de 2015. | 125 |
| Anexo B. Acuerdo 043 de 2006. | 127 |
| Anexo C. Matriz de selección. | 128 |
| Anexo D. Equipos y métodos de medición. | 129 |

NOMENCLATURA

| | | |
|---------------|---|---------------------|
| A | Área. | m |
| B_0 | Ancho en el fondo del canal. | m |
| B_1 | Ancho en la superficie del canal. | m |
| C | Concentración. | g/m^3 |
| C_p | Calor específico. | $cal/(g\ ^\circ C)$ |
| C_{pw} | Calor específico del agua. | $cal/(g\ ^\circ C)$ |
| E | Coeficiente de dispersión de masa. | $m^3/día$ |
| E' | Coeficiente de dispersión de calor. | $m^3/día$ |
| H | Profundidad del canal. | m |
| $J_{a,i}$ | Transferencia de calor entre aire y agua. | $cal/(cm^2\ día)$ |
| $J_{s,i}$ | Transferencia de calor entre sedimentos y agua. | $cal/(cm^2\ día)$ |
| n | Coeficiente de rugosidad o Factor de fricción de Manning. | |
| P | Perímetro. | m |
| Q_i | Caudal en el tramo i. | m^3/s |
| Q_{i-1} | Caudal antes del tramo i. | m^3/s |
| Q_{i+1} | Caudal después del tramo i. | m^3/s |
| Q_{in} | Caudal que ingresa al sistema. | m^3/s |
| Q_{evap} | Caudal que se evapora en el sistema. | m^3/s |
| Q_{out} | Caudal que sale del sistema. | m^3/s |
| R | Radio hidráulico. | m |
| S_0 | Pendiente con que discurre el agua. | m/m |
| S_{s1} | Pendiente lateral del canal. | m/m |
| S_{s2} | Pendiente lateral del canal. | m/m |
| t | Tiempo. | Día |
| T | Temperatura. | $^\circ C$ |
| V | Velocidad. | m/s |
| ε | Tolerancia del modelo. | |
| ρ | Densidad. | g/cm^3 |
| ρ_w | Densidad del agua. | g/cm^3 |

GLOSARIO

AGUA SUPERFICIAL: es un cuerpo de agua que se encuentra sobre la superficie terrestre, contempla los arroyos, estuarios, lagos y ríos; se caracteriza por su visibilidad y permanente contacto con la presión atmosférica.

CALIDAD DEL AGUA: es el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan si un cuerpo de agua es apropiado para un uso predeterminado.

CURTIDO: es el proceso mediante el cual la piel de los animales se ve transformada en cuero, mediante la acción de un agente curtiente como las sales de cromo o los taninos, los cuales son precursores de la estabilización de las fibras de colágeno con el fin de evitar la degradación de los tejidos por la acción de los microorganismos.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO – DBO₅: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días, también conocida como DBO Rápida, es un ensayo que permite determinar la cantidad de oxígeno requerido en los procesos metabólicos de los microorganismos, para llevar a cabo la degradación bioquímica de la materia orgánica presente en un cuerpo de agua en específico.

DBO LENTA: es un parámetro que se obtiene por la diferencia aritmética simple entre la Demanda Química de Oxígeno – DQO y la DBO₅; representando así al carbono de descomposición lenta presente en las sales, grasas y aceites.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – DQO: la Demanda Química de Oxígeno es un ensayo que permite determinar la cantidad de oxígeno necesario equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente, presente en un cuerpo de agua en específico, a condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

DESCARGA PUNTUAL: es la que se realiza a través de una tubería, canal o alcantarillado y se caracteriza porque es un sistema físicamente observable, fácilmente identificable y que se realiza en un solo punto.

DETERMINISTA: teoría mediante la cual, el resultado está directamente relacionado con el ingreso de información mediante una operación lógica de procesamiento de variables predeterminadas.

ECOSISTEMA LÓTICO: es un ecosistema en el cual el movimiento del agua es predominante en una dirección impulsada por la fuerza de la gravedad y presenta un estado de cambio físico continuo.

EMPÍRICO: conocimiento adquirido de manera experimental.

ESTOCÁSTICO: teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es de carácter aleatorio.

EUTROFIZACIÓN: es un ecosistema o ambiente acuático con entrada restringida de agua, el cual se caracteriza por poseer una anormal abundancia en nutrientes en forma de nitrógeno y fósforo, generalmente provenientes de la actividad humana; que generan un crecimiento descontrolado de algas que se proliferan en la superficie, impidiendo el paso de la luz solar por debajo de ellas y por consiguiente evitando la fotosíntesis de las demás algas que eventualmente se descomponen y generan pérdida de la calidad del agua.

MATERIA ORGÁNICA: es el agente contaminante por excelencia de las fuentes superficiales de agua. Se encuentra en los vertimientos urbanos o de actividades agrícolas, pecuarias o industriales.

MECANICISTA: conocimiento adquirido de manera procedimental.

MODELO DE CALIDAD DEL AGUA: es una herramienta lógica que permite reproducir los fenómenos hidráulicos, físicos, químicos y biológicos que ocurren en el recurso hídrico, mediante la solución de expresiones matemáticas complejas que representan una aproximación de dichos procesos y los componentes de la calidad del agua a estudiar, con el fin de generar estrategias de mejora continua.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES – SST: son partículas que flotan sobre un líquido o que se encuentran suspendidas en éste. Son visibles y pueden ser removidos mediante la implementación de métodos físicos, químicos, biológicos o mecánicos de separación.

TANINO: es un compuesto polifenólico de origen vegetal, el cual es empleado como agente curtiente ya que promueve la estabilización de las fibras de colágeno presentes en la piel, con el fin de evitar la degradación de éstas por acción microbiana.

TRIBUTARIO: es un flujo o caudal de agua que se caracteriza por desembocar en un río o mar, aportando todas sus características y asociando procesos como la dilución.

VERTIMIENTO: es la descarga de residuos líquidos de carácter industrial o residencial, a cuerpos de agua superficiales.

RESUMEN

La evaluación de la afectación del río Bogotá causada por el vertimiento generado en un proceso de curtido de pieles en el tramo comprendido entre las estaciones de Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar, se llevó a cabo teniendo en cuenta la afectación de 15 variables asociadas con la calidad fisicoquímica del agua (la conductividad eléctrica, el cromo total, la DBO₅, la DQO, el fósforo orgánico, el fósforo inorgánico, el nitrógeno orgánico, los nitratos, los iones de amonio, el oxígeno disuelto, el pH, los sólidos suspendidos totales, la alcalinidad, los sulfuros y la temperatura). Así mismo, mediante la matriz de selección de Pugh se determinó que el modelo QUAL2K es el software de carácter gratuito que mejor aproxima las condiciones y comportamiento del río Bogotá a la realidad del sistema, prediciendo la manera en que la descarga puntual del vertimiento perturba al cuerpo hídrico.

Esta perturbación se hace notoria cuando se comparan los resultados del análisis de la calidad del agua para fósforo total, nitratos, sólidos suspendidos totales y sulfuros con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y los de DBO₅ con los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo 043 de 2006, obteniendo como resultado que se sobrepasan en un 94, 474, 26, 29 y 200 por ciento respectivamente; permitiendo concluir que la descarga proveniente del proceso productivo de la transformación de la piel animal en cuero en el municipio de Villapinzón, aún no cumple con las exigencias mínimas establecidas por los entes de regulación ambiental que rigen al territorio colombiano, para que el río Bogotá no se vea afectado por su vertimiento.

PALABRAS CLAVE: curtido, materia orgánica, modelo de calidad del agua, QUAL2K, vertimiento.

INTRODUCCIÓN

Hace 40 años la humanidad atravesó un umbral de tolerancia que con el tiempo ha llevado a las personas a vivir en la onda verde¹; la cual implica procesos de producción sostenibles, química verde, cero emisiones de gases efecto invernadero, entre otras tendencias que han llevado a las empresas y al ciudadano de a pie, a estar cada vez más comprometidos con el ambiente, puesto que ese es un factor diferencial², razón por la cual las curtiembres han demostrado interés en que el proceso de tratamiento y producción del cuero cumpla con los estándares regidos por la normatividad ambiental legal vigente.

El planteamiento de este proyecto abarca la problemática existente en el río Bogotá, el cual es protagonista en más del 25% del desarrollo agrícola, pecuario e industrial a nivel nacional³, y que a pesar de ser una de las principales fuentes de abastecimiento de agua de la capital del país, es uno de los focos más grandes de contaminación hídrica en el territorio colombiano.

Dentro del proceso productivo de las curtiembres, el cual consiste en transformar un subproducto de la industria cárnica en un producto útil y de alta demanda como lo es el cuero; se generan aguas residuales en cada una de sus etapas, es por esto, que dichas empresas deben solicitar un permiso de vertimientos, el cual intrínsecamente involucra la modelación de la calidad del agua según la normatividad ambiental que rige al territorio colombiano, empleando modelos matemáticos de gran complejidad, que son procesados por un software encargado de la modelación de la calidad del agua como herramienta de predicción y análisis, basándose en antecedentes del proceso, artículos científicos relacionados con el tema y el impacto histórico en el acuífero, con el fin de evaluar la afectación de la empresa a un efluente en específico, el cual para este caso es el río Bogotá.

En ese orden de ideas, para dar cumplimiento a lo previamente mencionado, se emplean los datos de los parámetros de la calidad del agua proporcionados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR en las estaciones de monitoreo que esta entidad destina para conocer las características fisicoquímicas de la cuenca hídrica a lo largo de su cauce.

La modelación del río Bogotá, es realizada por la autoridad ambiental correspondiente. En esta se tiene en cuenta la extensión de dicha cuenca, los diferentes vertimientos y extracciones que se hacen del cuerpo de agua. La gestión

¹ KLETZ, Trevor Asher. What you don't have, can't leak. En: Chemistry and Industry. Agosto 2013. p. 43.

² Ibid., p. 47.

³ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. *Así es el río Bogotá*. [Consultado el 10 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/6TFhd3>

del recurso hídrico se lleva a cabo mediante los diferentes planes de ordenamiento como la política nacional para la gestión del recurso hídrico y cada una de las curtiembres de la cuenca alta del río Bogotá deben reportar su simulación ante este ente regulador; para así poder realizar su vertimiento en fuentes de agua superficial tal como lo indica el Decreto 3930 de 2010.

Por último, es importante recalcar, que el presente documento hace referencia a la calidad del agua y explica los fenómenos que permiten modelar la afectación de la materia orgánica en el sistema, para lo cual, se basa en la descripción de algoritmos matemáticos que permiten predecir el estado de la fuente superficial y su afectación actual producto de la actividad humana; actualmente se emplean numerosos programas de computacionales para determinar la calidad del agua, por lo cual se hace fundamental seleccionar el software más apropiado y que permita responder adecuadamente a las necesidades del sistema.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la afectación del río Bogotá causada por el vertimiento generado en un proceso de curtido de pieles, en el tramo comprendido entre las estaciones de Villapinzón y Río Tejar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar las variables significativas para la simulación de calidad del agua producida en un proceso de curtido.
2. Seleccionar un software de simulación de carácter libre, que cumpla con las especificaciones para modelar el impacto producido por el vertimiento industrial al sistema de estudio.
3. Evaluar la afectación del río Bogotá, como resultado de la descarga de los vertimientos de la industria, mediante el software seleccionado.

1. GENERALIDADES

Para la modelación de la calidad del agua, es necesario conocer plenamente el sistema, y así, conocer los parámetros que permiten determinar las condiciones de entrada del modelo a tratar. Es por esto que en esta sección, se hará referencia a la ubicación geográfica del municipio de Villapinzón como lugar de interés, ya que su economía está basada principalmente en la adecuación y producción de cuero a partir de la piel de animales, razón por la cual es indispensable conocer el proceso llevado a cabo en una curtiembre; ésta actividad genera un efluente, que por lo general es dispuesto como vertimiento en las fuentes superficiales cercanas, como ríos, quebradas, lagos, estuarios, entre otras. Los parámetros que son monitoreados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR en sus estaciones de monitoreo a lo largo de la cuenca del río, son el eje de la modelación y en consecuencia se acogen a la normatividad colombiana para solicitud del permiso de vertimientos y límites permisibles.

1.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

Villapinzón, llamado Hatoviejo en la época de la colonia, es un municipio del departamento de Cundinamarca (Colombia), con 19.742 habitantes aproximadamente, ubicado en la provincia de Almeidas, a 80 km de Bogotá D.C. La altitud media de la cabecera municipal es de 2.715 m.s.n.m. y su temperatura promedio es de 13,2°C⁴.

El río Bogotá, desde su nacimiento en el Páramo de Guacheneque en el municipio de Villapinzón, atraviesa todo el departamento de Cundinamarca hasta su desembocadura en el río Magdalena a la altura del municipio de Girardot como se muestra en la Figura 1. Es usado como una de las fuentes principales para consumo de agua potable y para los procesos agrícolas, pecuarios e industriales de la zona⁵; en los cuales se basa la economía de gran parte de los municipios por los que su cauce transcurre. Para el interés del presente documento, se hace referencia a Villapinzón, municipio en el cual se destacan la actividad agrícola, de cultivos de zanahoria, arveja, hibus, rubas, habas y papa, ganadera, principalmente en la producción lechera, comercial, de insumos agrícolas y elementos de primera necesidad para la canasta familiar e industrial, del curtido de pieles⁶. Dicha actividad

⁴ Alcaldía de Villapinzón - Cundinamarca. *Nuestro municipio*. [Consultado el 30 de noviembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/A94MRe>

⁵ Alcaldía de Villapinzón - Cundinamarca. *Nuestro municipio*. [Consultado el 30 de noviembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/A94MRe>

⁶ ROJAS AMAYA, Franklin Vicente. Estudio Económico-Financiero Del Aprovechamiento De Las Grasas Extraídas Del Residuo De Descarne “unche” Derivado Del Proceso De Curtición En El Municipio De Villapinzón – Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia, 2010. p. 24.

La red de monitoreo de calidad hídrica del río Bogotá, es de aproximadamente 300 kilómetros, y se realiza en 68 estaciones fijas de monitoreo, las cuales están repartidas entre las cuencas alta, media y baja del afluente; en las cuales se lleva a cabo un seguimiento de la calidad y la cantidad de agua⁸. Para el caso de estudio, se tendrán en cuenta las mediciones de las seis primeras estaciones de la red: Aguas arriba Villapinzón, Puente Villapinzón, Aguas arriba Q. Quincha, LM Chingacio y Río Tejar⁹, ya que estas se encuentran dentro del área de influencia de la descarga puntual que hace la empresa ubicada en el municipio de Villapinzón. Por otra parte, el río está enmarcado por una topografía irregular y pendiente, que oscila entre 3300 y 280 metros sobre el nivel del mar.¹⁰

El cuero es un subproducto de la industria cárnica y teniendo en cuenta, que la piel de animal que se usa en mayor proporción en las curtiembres de Colombia es la de ganado bovino¹¹, se hace necesario hacer mención de las cabezas de ganado que son sacrificadas en el departamento al que pertenece Villapinzón. Según el Boletín Técnico de mayo de 2017 (encuesta de sacrificio de ganado) del Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, en el primer trimestre del año 2017, se registraron 46606 cabezas de ganado vacuno sacrificadas en el departamento de Cundinamarca (sin contar a Bogotá D.C.), las cuales representan el 5,5% de un total de 845441 a nivel nacional, lo anterior permite concluir que, en Villapinzón se cuenta con disponibilidad de materia prima para la industria de producción de cuero.

1.1.1 El agua superficial. Es como su nombre lo indica, aquella que se encuentra sobre la superficie terrestre en forma de charcos, lagos, ríos, lagunas¹². La fuente receptora de los vertimientos de la curtiembre ubicada en Villapinzón es el río Bogotá, el cual se describió en la sección anterior. Es una corriente natural que fluye con continuidad, característica propia de dicho sistema, discurre por efecto de la gravedad hacia las partes bajas, posee un caudal determinado y su respectiva desembocadura tiene lugar en el mar, lagos u otros ríos¹³; pero los ríos no son la

⁸ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Integración De Sistemas De Alertas Tempranas Y Comité Hidrológico. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2011. p. 21.

⁹ Dirección de monitoreo, modelamiento y laboratorio ambiental. Parámetros De Calidad Del Río Bogotá. Certificado: Envío documento No. 20172157207 (*certimail*). [online]. mensaje a: Juan Felipe Soto Moya. Bogotá D.C.: 2017. Personal Communication.

¹⁰ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Avanza recuperación ambiental, social, cultural y económica del Río Bogotá*. [Consultado el 01 de diciembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/2UBvpn>

¹¹ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Guía Ambiental Para La Industria Del Curtido Y Preparado De Cueros. Segunda edición ed. Bogotá D.C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2006. p. 25.

¹² CÁRDENAS, Gustavo y CÁRDENAS, Jeannette. Agricultura, Urbanización Y Agua. Montevideo, Uruguay: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2009. p. 13.

¹³ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. *Aguas superficiales*. [Consultado el 01 de diciembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/TbkRir>

única fuente de agua superficial, también es importante resaltar la existencia de los arroyos, lagos y estuarios; los cuales coinciden en ser receptores de residuos debido a la visibilidad que se tiene de estos y al uso público que se les ha dado a lo largo de la historia.

1.1.2 Canal abierto. Los canales abiertos son definidos como conductos en los cuales el agua fluye libremente¹⁴. El sistema de estudio se considera como un canal abierto y natural, ya que se encuentra en contacto permanente con la atmósfera. Ésta clasificación le otorga propiedades hidráulicas irregulares, por lo cual, se hacen algunas suposiciones empíricas de acuerdo con las observaciones y la experiencia real, esto con el fin de representar adecuadamente el comportamiento del río, mediante modelos matemáticos.

1.2 PROCESO DE UNA CURTIEMBRE

Generalmente cada una de las etapas en un proceso industrial se subdividen en diferentes procesos u operaciones unitarias, que implican balances de masa y energía, un gasto energético, de insumos, de materia prima, entre otros factores que se deben tener en cuenta para elaborar un producto final con las características que satisfagan las especificaciones del cliente¹⁵. En ese orden de ideas, la curtiembre no es la excepción; a continuación, se describe el proceso que se lleva a cabo para transformar un subproducto de la industria cárnica en un producto útil y de alta demanda como lo es el cuero.

El curtido de pieles es uno de los oficios más antiguos de la humanidad, y tuvo origen cuando el hombre primitivo se dio cuenta que los animales le ofrecían algo más que solo alimento¹⁶; este proceso se ha destacado a lo largo de la historia ya que ha evolucionado y adaptado sus técnicas de acuerdo a los avances del conocimiento y a las cada vez más exigentes necesidades del hombre, empleando sustancias para curtir como la sal, la grasa, el humo, productos vegetales ricos en taninos, minerales, productos químicos, entre otros¹⁷.

¹⁴ MOTT, Robert. *Mecánica De Fluidos Aplicada*. Cuarta ed. México: Pearson Education, 1996. p. 351.

¹⁵ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. *Modelación De La Calidad De Agua Del Vertimiento En Un Proceso De Curtido*. Fundación Universidad de América, 2017. p. 25.

¹⁶ SILVA BUÑAY, Diego Stalin. *Obtención Del Cuero Para Guantería Fina Con La Utilización De Diferentes Niveles De Aldehídos*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2015. p. 16.

¹⁷ LÓPEZ LÓPEZ, Antonio. *Evaluación Completa De La Exposición a Contaminantes Químicos Por Vía Inhalatoria*. Universitas Miguel Hernández, 2015. p. 9.

Por definición, se entiende que la curtición es el proceso mediante el cual se convierte en cuero la piel de los animales¹⁸, tales como bovinos, ovinos, porcinos, caprinos y reptiles¹⁹; sin embargo, para que este cuero pueda ser utilizado como tal en la confección de prendas de vestir y marroquinería, es necesario que pase por una seguidilla de etapas previas llevadas a cabo en la curtiembre, las cuales para el presente documento estarán divididas en cuatro: ribera, proceso de curtido, post-curtido y acabado²⁰.

1.2.1 Primera etapa, ribera. La ribera tiene como objetivo general: limpiar y preparar la piel que se va a curtir. Para ello, remueve el pelo o la lana (dependiendo del animal del que provenga la piel), la dermis y la endodermis²¹ de la materia prima, al mismo tiempo que hidrata la piel y remueve más impurezas. Al ser la primera etapa del proceso realizado en una curtiembre, depende de diferentes factores externos que no se pueden controlar directamente, como lo son el descarte realizado en los mataderos, el tiempo de transporte, el tiempo y temperatura de almacenamiento, los tratamientos de conservación e incluso, el tamaño de la piel antes de ingresar a la planta.

Los pasos intermedios que están comprendidos en la ribera, son los que a comparación del resto de las demás etapas del proceso productivo, generan un mayor consumo de agua.

- **Recepción.** Para la recepción de la piel que es usada como materia prima, la cual tiene diferentes maneras de ser acogida por la empresa se tienen en cuenta, en primer lugar, que aquellas pieles que han tenido un proceso previo para su conservación como el salado (piel verde), su ingreso puede darse sin ningún tipo de tratamiento adicional, luego están las pieles frescas o en sangre; estas dos últimas, deben ingresar directamente al proceso productivo sin ningún tipo de demora o retraso²².
- **Remojo.** El remojo se encarga principalmente de devolverle a la piel cierto estado de hidratación tratando de imitar el natural, preparar la piel y también ayudar con

¹⁸ LOFRANO, Giusy, et al. Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: a review. En: The Science of the Total Environment. Septiembre 2013, p. 265.

¹⁹ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Dario y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 27.

²⁰ DIXIT, Sumita, et al. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. En: Journal of Cleaner Production. Enero 2014, p. 39.

²¹ ROJAS AMAYA, Franklin Vicente. Op. Cit., p. 26.

²² CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique y CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual De Procedimientos Para El Manejo Adecuado De Los Residuos De La Curtiduría. Instituto Nacional de Ecología. México D.F: 1999. p. 32.

la limpieza de sustancias que dificultan el curtido²³, especialmente aquellas que están asociadas directamente con el animal como lo son la sangre o el estiércol; además de remover los productos que hayan sido usados para el proceso de conservación de la piel si tuvieron lugar antes de llegar a la curtiembre. Ésta parte del proceso se realiza en tambores rotatorios, fulones o bombos y puede tardarse de 6 a 24 horas; en algunos casos aislados, se hace necesario un preremajo con el fin de retirar el exceso de sal y las impurezas adquiridas durante las operaciones anteriores²⁴. Para el lavado, se agregan bactericidas y tensoactivos con el fin de acabar con las fuentes de sustrato de las bacterias; sin embargo, si el remojo no se lleva a cabo de la manera correcta, acarreará consigo resultados no deseados, dentro de los cuales se destaca la obtención de cueros crudos, que de vez en cuando presentan manchas y una dureza diferente a la deseada.

- **Pelambre.** En esta etapa se lleva a cabo la extracción del pelo o lana y de las diferentes capas de la piel, también se procede al ablandamiento y solubilización de las fibras de colágeno presentes en la piel mediante la acción enzimática, y para lograr este cometido, se hace uso de un ataque químico, el cual generalmente se lleva a cabo con sulfuro de sodio (Na_2S) y cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), aunque en algunas ocasiones se trabaja el sulfhidrato de sodio (NaHS) con el fin de disminuir los iones OH^- ²⁵. La remoción de estos compuestos de la materia prima, se da por intercesión de un lavado posterior a la depilación; la unión de estos pasos intermedios, completan el proceso de pelambre.
- **Desencalado.** Es un proceso en el cual se lleva a cabo la eliminación de los restos de hidróxido de calcio en la piel, con el fin de disminuir el pH a zonas más neutras, utilizando agua, sales de amonio, ácidos orgánicos e inorgánicos, tensoactivos y bisulfito sódico.
- **Rendido o purga enzimática.** Consiste en remover impurezas que dificultan el proceso de curtido de la materia prima, utilizando agua y algunas enzimas.
- **Lavado.** Emplea agua y tensoactivos con el fin de frenar la acción enzimática y eliminar los residuos generados en los pasos inmediatamente anteriores²⁶.

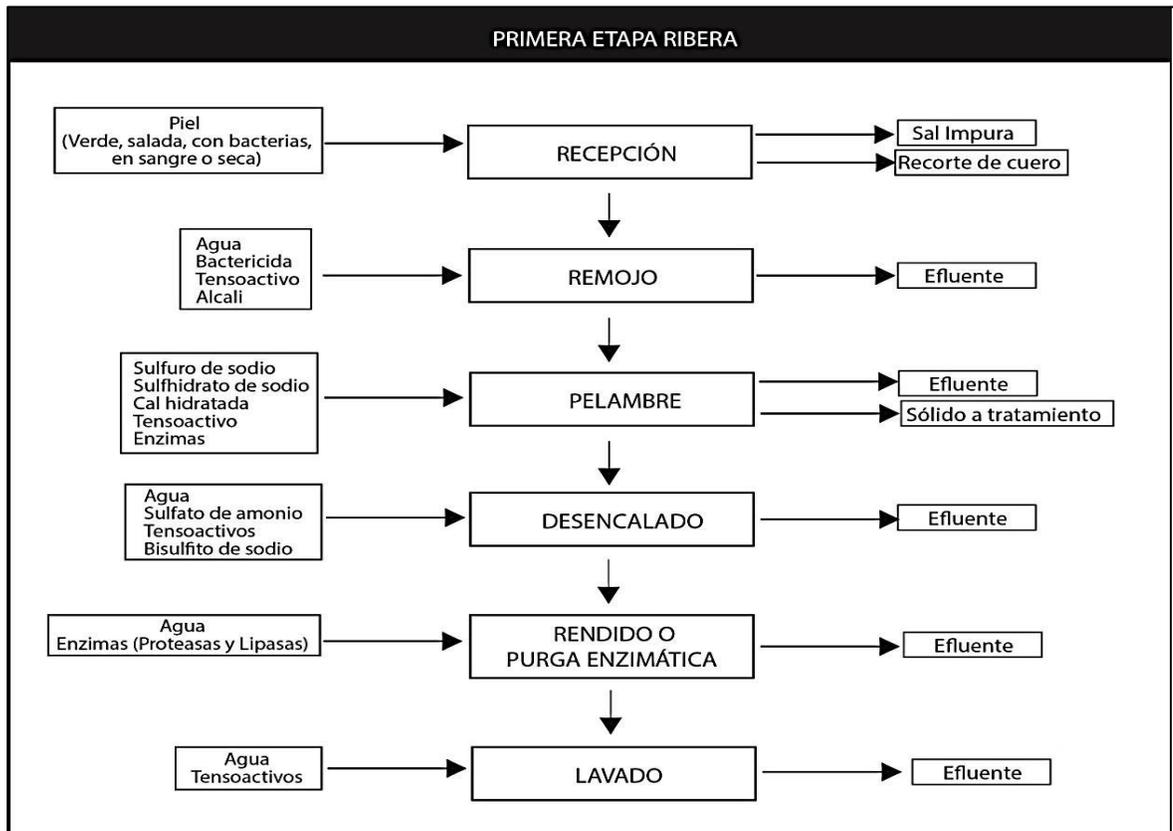
²³ DIXIT, Sumita, *et al.* Op. Cit., p. 41.

²⁴ VILLENA MOZO, Marco Antonio. Efecto De La Concentración De Tres Engrasantes En Las Propiedades Físicas Del Cuero Vacuno Curtido Al Cromo. Universidad Nacional de Trujillo, 2013. p. 7.

²⁵ *Ibid.*, p. 8.

²⁶ CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique y CORTINAS DE NAVA, Cristina. Op. Cit., p. 35.

Figura 2. Primera etapa, ribera.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 28.

De los residuos líquidos generados en una curtiembre, aproximadamente el 65%²⁷, se producen en los procesos intermedios que comprenden esta etapa. El proceso conocido como pelambre es el responsable del 84% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO, 75% de la Demanda Química de Oxígeno – DQO y 92% de los Sólidos Suspendedos Totales – SST de las aguas residuales de una curtiembre²⁸. Además, el uso de sulfuro de sodio durante este proceso no solo provoca efectos

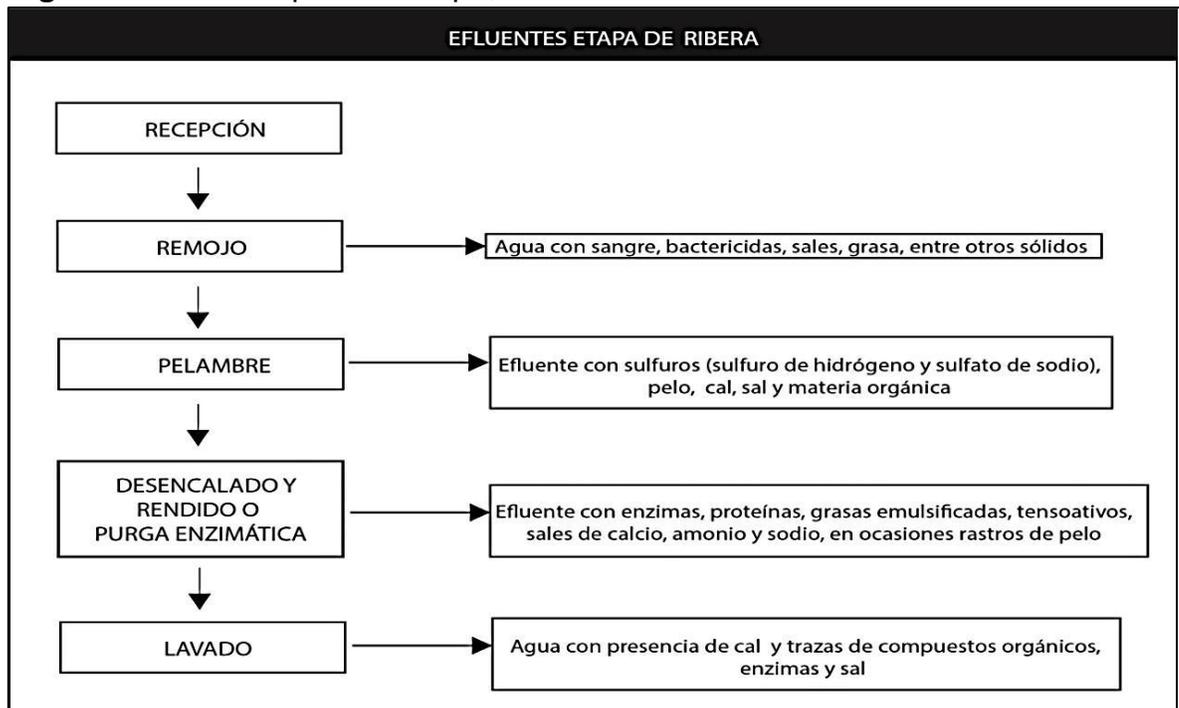
²⁷ ARANGO ESCOBAR, Carlos Alberto; ARAGÓN GUZMÁN, Mónica y ALZATE TEJADA, Adriana María. Sistema De Referenciación SIRAC Para El Sector Curtiembre En Colombia: Proyecto Gestión Ambiental En La Industria De Curtiembre En Colombia. Medellín: Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2004. p. 22.

²⁸ DIXIT, Sumita, *et al.* Op. Cit., p. 44.

negativos en ambiente, sino que afecta la eficacia de las plantas de tratamiento de aguas residuales²⁹.

La Figura 3 muestra los residuos de cada uno de los procesos intermedios de la primera etapa del proceso de curtido de pieles, haciendo énfasis en los vertimientos. Estos desechos líquidos tienen características particulares como: pH alcalino, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, cloruros, contenido de cal, sulfuros, nitrógeno orgánico, elevada DQO y DBO; debido a las grasas inherentes a los animales y materia orgánica en forma de estiércol, sangre y pelo.

Figura 3. Efluentes primera etapa, ribera.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 38.

1.2.2 Segunda etapa, proceso de curtido. El curtido es una etapa posterior a la ribera, mediante la cual se transforma la piel de los diferentes animales en cuero debido a la acción de diferentes agentes curtientes como las sales de cromo o los

²⁹ CARREÑO SAYAGO, Uriel Fernando y MÉNDEZ SAYAGO, Jhon Alexander. Estimación de la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan con lagunas de estabilización en la cuenca alta y media del río Bogotá. Junio 2011. En: Universidad Del Valle. p. 11.

taninos, los cuales estabilizan las fibras de colágeno para evitar la degradación o putrefacción de los tejidos por la acción microbiana³⁰.

1.2.2.1 Curtido al cromo. El curtido al cromo es un proceso que está compuesto por cuatro pasos intermedios: piquelado, curtido, basificado y neutralización. Esta alternativa de curtición es la de más amplia aplicación en la industria curtiente de hoy en día, ya que es versátil y permite la utilización de otros agentes curtientes, los cuales son necesarios para lograr algunas características específicas requeridas por el cliente en el producto final.

- **Piquelado.** Es el primero de los cuatro pasos intermedios y consiste en la preparación y adecuación del cuero y complementa los últimos tres pasos de la etapa de ribera; ya que es una operación en la que se elimina la cal combinada con el colágeno y se interrumpen completamente las reacciones enzimáticas por medio de la adición de ácidos y sales, dejando así la piel lista para el curtido o para su posterior almacenamiento.
- **Curtido.** El curtido con cromo es utilizado en el 80 a 90% de producción de cuero a nivel mundial³¹. El cromo trivalente es preferido debido a sus propiedades deseables para producir diferentes tipos de cueros, suaves, con buena fijación de color y altamente estables. El cromo tiene como propósito convertir las pieles en material no putrescible, penetrando en la piel, logrando así que reaccione con los componentes orgánicos de ésta y llegue a la formación de complejos bioinorgánicos como las cromoproteínas, aumentando la temperatura de contracción o encogimiento del material³².
- **Basificado.** Con el fin de lograr una mayor fijación de cromo en la piel a tratar y aumentar el pH del sistema, se agregan sustancias alcalinas como el carbonato de sodio, el óxido de magnesio, el bicarbonato de sodio, entre otras que favorecen la reacción con los ligantes orgánicos durante el basificado³³.
- **Neutralización.** Con el fin de aumentar el pH y eliminar el riesgo de hidrólisis lenta de la proteína de la piel y, en consecuencia, la pérdida de resistencia de la misma, se eliminan las sales sin fijar del cromo y los ácidos fuertes por medio de agentes neutralizantes, enmascarantes o recurtientes.

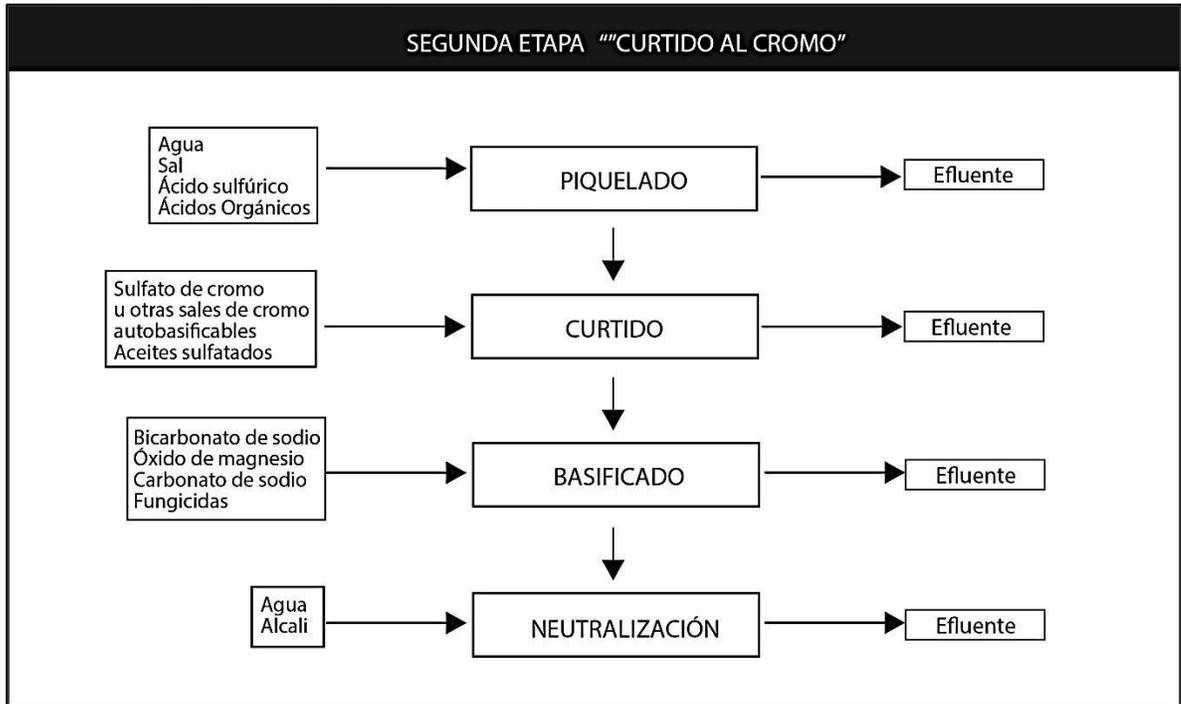
³⁰ ROJAS AMAYA, Franklin Vicente. Op. Cit., p. 28.

³¹ RÍOS POZO, Juan Eduardo y SÁNCHEZ NICHU, Wilder Johans. Prevención Y Control De La Contaminación En La Industria Manufacturera Sub-Sector Curtiembre, Implementando Un Programa De Producción Más Limpia En La Empresa Quimipiel S.A.C. Universidad Nacional de Trujillo, 2006. p. 76.

³² VILLENA MOZO, Marco Antonio. Op. Cit., p. 10.

³³ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 28.

Figura 4. Segunda etapa, proceso de curtido al cromo.



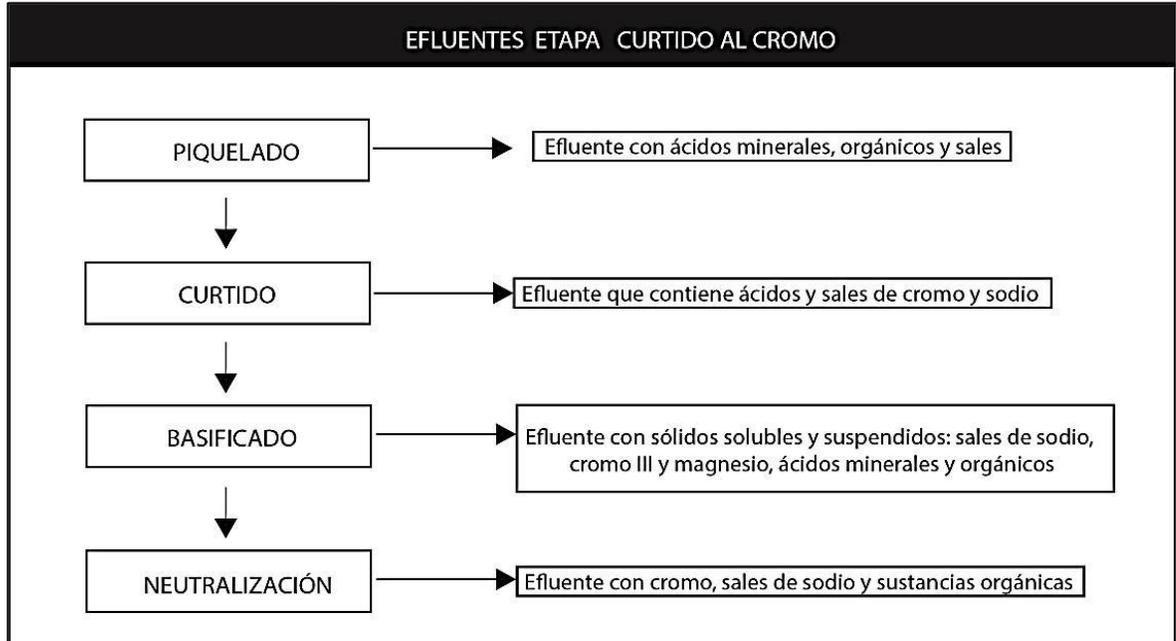
Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 30.

Los residuos líquidos de ésta etapa del proceso productivo, generalmente se caracterizan por tener altos niveles de DQO, cloruros, sulfatos, algunas trazas de sulfato de sodio, proteínas y elevadas concentraciones de cromo, principalmente cromo III para el caso del curtido al cromo³⁴.

Los detalles de los residuos líquidos de las operaciones que comprenden la etapa de curtido al cromo, se encuentran en la Figura 5.

³⁴ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 36.

Figura 5. Efluentes segunda etapa, proceso de curtido al cromo.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 39.

1.2.2.2 Curtido vegetal. El curtido vegetal es un proceso que está compuesto por cinco pasos intermedios: piquelado, curtido, fijación o acidificación, reposo y escurrido. Esta técnica de curtido, emplea como agente curtidor, sustancias naturales ricas en taninos, los cuales se pueden encontrar en la sabia, corteza, frutos, flores, semillas y raíces de distintos tipos de árboles y plantas.

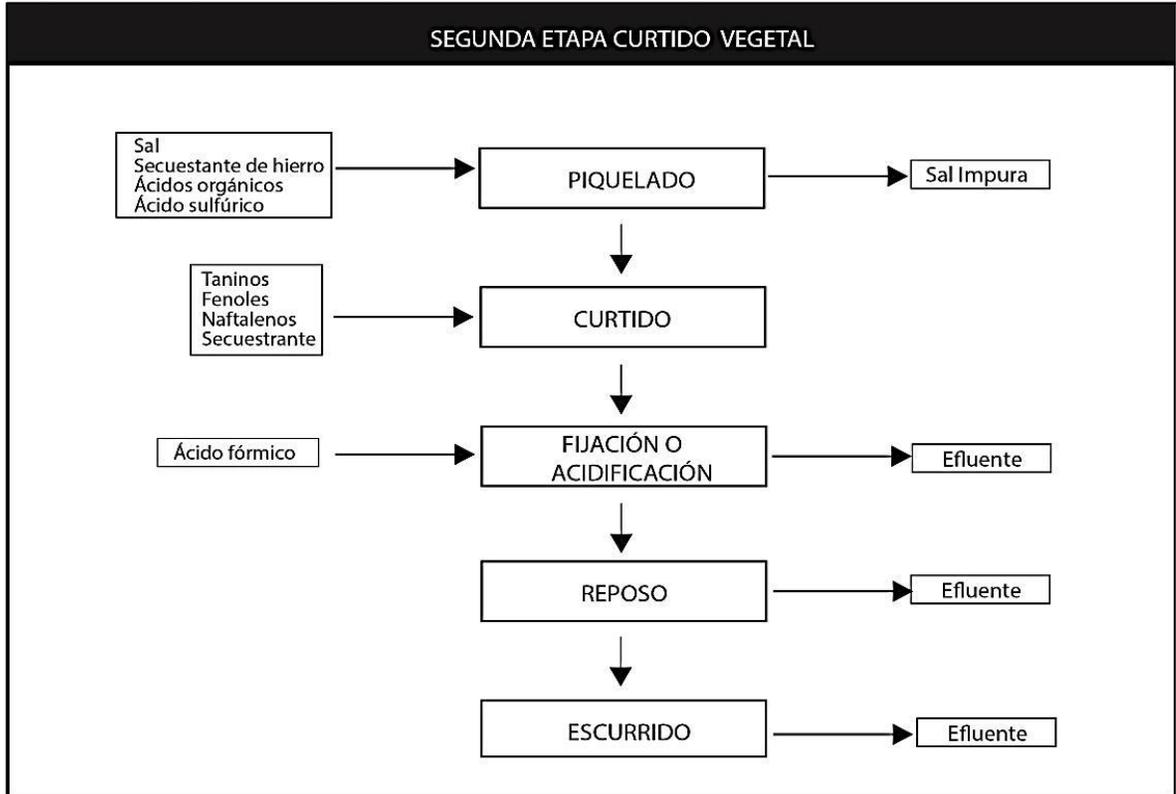
- **Piquelado.** Al igual que en el curtido al cromo, el piquelado consiste en la preparación y adecuación del cuero y complementa los últimos tres pasos de la etapa de ribera; ya que es una operación en la que se elimina la cal combinada con el colágeno y se interrumpen completamente las reacciones enzimáticas por medio de la adición de ácidos y sales, dejando así la piel lista para el curtido o para su posterior almacenamiento.
- **Curtido.** Como agente curtiente, generalmente se usan taninos provenientes de diferentes partes del quebracho, la acacia negra, el mangle rojo, el guamo, el castaño, el roble, la algarrobilla, y la mimosa³⁵. Lo cuales cumplen de manera análoga al cromo con el cometido de hacer del cuero, un material inocuo.

³⁵ ISAZA M., José Hipólito. Taninos o polifenoles vegetales. En: Scientia Et Technica. Mayo 2007, p. 15.

- **Fijación o acidificación.** La fijación de los taninos que contienen dichas especies de origen vegetal al cuero, se logra debido a la adición de ácidos, usualmente ácido fórmico, el cual hace que el pH del sistema varíe según las necesidades del producto final a obtener.
- **Reposo.** Es un proceso estacionario en el cual se deja el cuero en reposo, con el fin de que continúe en curso la reacción de los taninos y el colágeno de la piel, generando un agua residual característica.
- **Ecurrido.** Proceso en el cual se prensa y aplana el cuero por acción mecánica, con el fin de remover la humedad, estirar las arrugas que traiga consigo de procedimientos anteriores el cuero y lograr un espesor uniforme³⁶; nuevamente reiterando que cada una de las características depende del producto para el cual se pretenda el material.

³⁶ VILLENA MOZO, Marco Antonio. Op. Cit., p.11.

Figura 6. Segunda etapa, proceso de curtido vegetal.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 31.

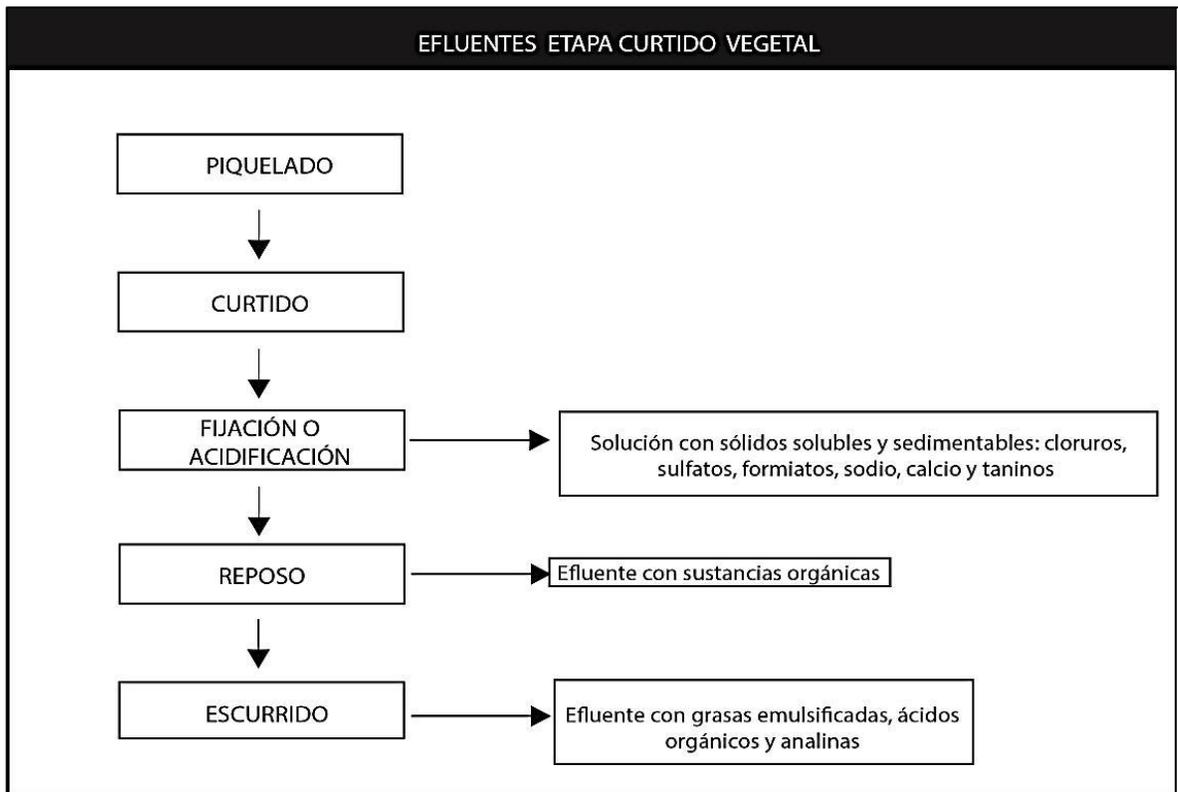
Teniendo en cuenta que el curtido vegetal presenta ventajas considerables en cuanto a la disminución de la contaminación, con respecto al curtido al cromo convencional, es un proceso muy poco utilizado, ya que sacrifica parte de la calidad del producto terminado³⁷ y lo más importante, resulta más costoso debido a la escases de taninos para tal fin, lo cual lo hace muy poco útil y pertinente para procesos industriales a gran escala³⁸.

Los detalles de los residuos líquidos de las operaciones que comprenden la etapa de curtido vegetal, se encuentran en la Figura 7.

³⁷ MUHAMAD GONZÁLEZ, María Susana y ACERO AGUIRRE, Alberto. Guía De Producción Más Limpia Para El Sector Curtiembres De Bogotá: Enfoque En Vertimientos Y Residuos. Bogotá D.C.: Secretaría Distrital de Ambiente, 2015. p. 23.

³⁸ LOFRANO, Giusy, *et al.* Op. Cit., p. 271.

Figura 7. Efluentes segunda etapa, proceso de curtido vegetal.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 40.

1.2.3 Tercera etapa, recurtido. Una vez más, el agente curtiente es determinante en el proceso y esta no será la excepción. Para cada tipo de curtido, existen procesos de terminado en húmedo diferentes³⁹. El procedimiento de post-curtido o recurtido, busca mejorar las propiedades del cuero; dentro de éstas se encuentran la resistencia mecánica, la maleabilidad y la suavidad. También lo componen otros ítems como el teñido, engrase, escurrido y estirado según sea el requerimiento del cliente.

1.2.3.1 Acabado en húmedo para cueros curtidos al cromo

- **Recurtido.** Es un proceso suplementario, por el cual se le otorgan propiedades específicas y finales al cuero, dependiendo de los requerimientos del cliente.

³⁹ SARAVANABHAVAN, S., et al. A one-bath chrome tanning together with wet-finishing process for reduced water usage and discharge. *En: Clean Technologies and Environmental Policy*. Julio 2005, p. 170.

- **Neutralización.** Con el fin de aumentar el pH y eliminar el riesgo de hidrólisis lenta de la proteína de la piel y en consecuencia, la pérdida de resistencia de la misma, se eliminan en húmedo las sales sin fijar del cromo y los ácidos fuertes por medio de agentes neutralizantes, enmascarantes o recurtientes.
- **Blanqueo.** Es opcional, ya que depende del uso que le dará el cliente final.
- **Teñido o tintura.** El cuero se trata con colorantes sintéticos, ácidos directos, de complejo metálico, básicos o reactivos⁴⁰, con el fin de dar a la piel el color que el cliente desea. Además de colorantes, se emplean productos como los tensoactivos, los dispersantes y el amoniaco, con el fin de mejorar la coloración. Es opcional, ya que depende del uso que le dará el cliente final.
- **Engrasado.** Para lubricar las fibras de la piel y evitar que éstas se unan, se emplean aceites de origen vegetal, animal, o mineral en procesos de sulfonación, sulfitación y sulfocloración⁴¹, los cuales le otorgan suavidad, fuerza, flexibilidad y resistencia al cuero, para que luego no se vaya a quebrar, rasgar o romper al doblarlo.
- **Ecurrido y estirado.** Se da primero, por acción de la gravedad, de factores climatológicos, calor o de una fuerza mecánica externa, se lleva a cabo el escurrido y prensado del cuero, generando efluentes de alto potencial contaminante, debido a que contienen cromo en solución ácida y posteriormente el estirado, ya que, en las previas etapas, en el cuero aparecen arrugas e imperfecciones, las cuales se pueden corregir por medio de un estirado el cual varía el espesor de la pieza.

⁴⁰ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 30.

⁴¹ VILLENA MOZO, Marco Antonio. Op. Cit., p. 14.

Figura 8. Tercera etapa, recurtido para cueros curtidos al cromo.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 33.

1.2.3.2 Acabado en húmedo para cueros curtidos por curtido vegetal

- **Recurtido al tanino.** Es un proceso de curtido con taninos suplementario al primero, por el cual se le otorgan propiedades específicas y finales al cuero, dependiendo de los requerimientos del cliente.
- **Blanqueo.** Es opcional, ya que depende del uso que le dará el cliente final.
- **Teñido o tintura.** El cuero se trata con colorantes sintéticos, ácidos directos, de complejo metálico, básicos o reactivos⁴², con el fin de dar a la piel el color que el cliente desea. Además de colorantes, se emplean productos como los

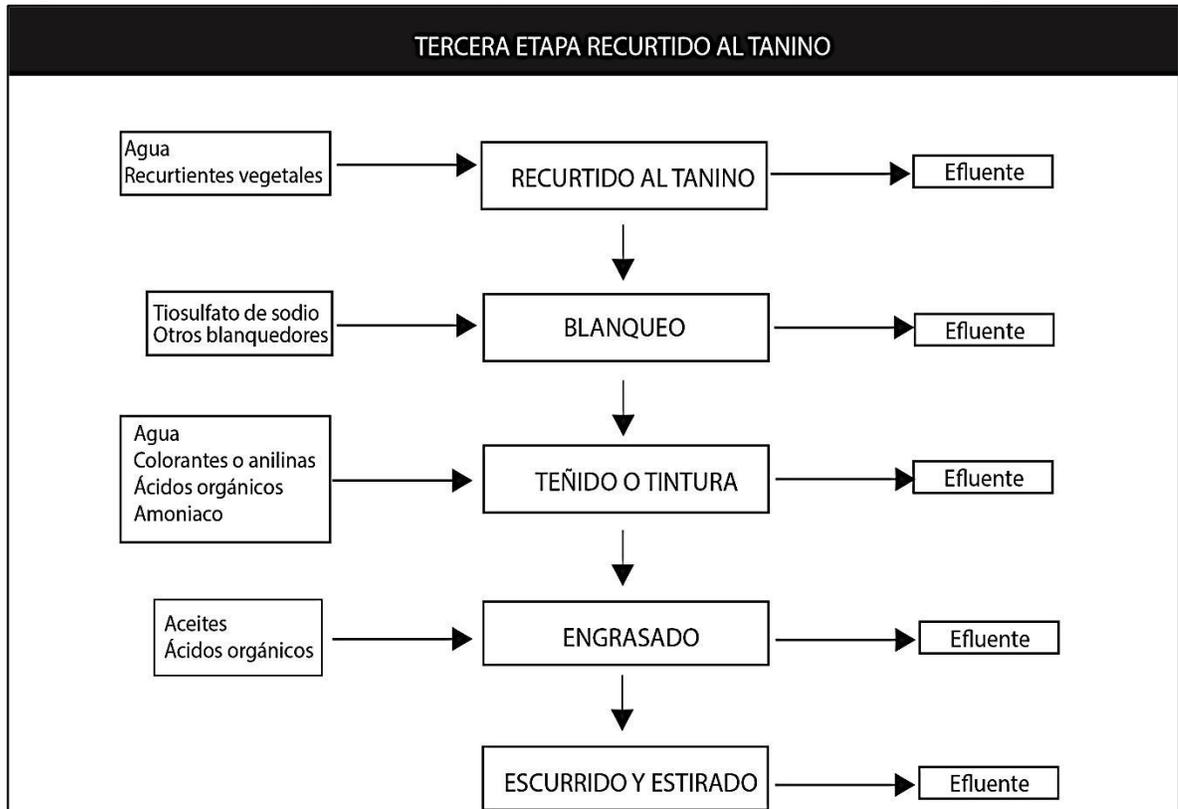
⁴² SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 31.

tensoactivos, los dispersantes y el amoníaco, con el fin de mejorar la coloración. Es opcional, ya que depende del uso que le dará el cliente final.

- **Engrasado.** Para lubricar las fibras de la piel y evitar que éstas se unan, se emplean aceites de origen vegetal, animal, o mineral en procesos de sulfonación, sulfitación y sulfocloración⁴³, los cuales le otorgan suavidad, fuerza, flexibilidad y resistencia al cuero, para que luego no se vaya a quebrar, rasgar o romper al doblarlo.
- **Ecurrido y estirado.** Se da primero, por acción de la gravedad, de factores climatológicos, calor o de una fuerza mecánica externa, se lleva a cabo el escurrido y prensado del cuero, generando efluentes de alto potencial contaminante, debido a que contienen cromo en solución ácida y posteriormente el estirado, ya que, en las previas etapas, en el cuero aparecen arrugas e imperfecciones, las cuales se pueden corregir por medio de un estirado el cual varía el espesor de la pieza.

⁴³ VILLENA MOZO, Marco Antonio. Op. Cit., p. 14.

Figura 9. Tercera etapa, recurtido para cueros curtidos por curtido vegetal.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 34.

Los procedimientos que componen el recurtido, son de menor importancia en cuanto a la contaminación y generación de aguas residuales se trata.

En ésta etapa solamente se tienen en cuenta los acabados en húmedo, debido a su baja toxicidad y el DBO, los cuales tan solo representan el 5% del total de la contaminación⁴⁴ por residuos líquidos generados en las aguas residuales de una curtiembre.

1.2.4 Cuarta etapa, acabado. Los nueve pasos del acabado le otorgan a los cueros provenientes del curtido al cromo y del curtido por curtido vegetal, mayor brillo, color, estabilidad, resistencia a la luz, y en general, mejoran la calidad del cuero, mediante la incorporación de ciertos aditivos como pigmentos, ligantes acrílicos, cera, penetrante, entre otros⁴⁵.

⁴⁴ DIXIT, Sumita, *et al.* Op. Cit., p. 40.

⁴⁵ RÍOS POZO, Juan Eduardo y SÁNCHEZ NICHÓ, Wilder Johans. Op. Cit., p. 83.

- **Secado.** El secado es un proceso que se puede llevar a cabo al aire libre o por la aplicación de calor mediante máquinas. El secado al aire libre, por sí solo no consume energía, sin embargo, depende de las condiciones climatológicas del medio como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, entre otras que pueden llegar a ser variables; por otra parte, el secado forzado por la aplicación de calor es más versátil, pero requiere de un consumo energético, el cual es transformado y transmitido al sistema en forma de calor por conducción, convección o radiación⁴⁶.
- **Desorillado.** Es un proceso de corte de material sobrante, generando retazos y sobrantes de cuero.
- **Ablandado.** Debido a los tratamientos anteriores, el cuero pierde flexibilidad y eso hace necesario un ablandamiento para obtener un producto con las características de suavidad requeridas por el cliente.
- **Esmerilado.** También se conoce como lijado. Es un procedimiento por el cual pasa el cuero, con el fin de igualar y corregir ciertos defectos superficiales⁴⁷.
- **Sacudido.** Es la continuación del esmerilado, ya que en éste se remueven del cuero los restos finos y demás sobrantes del procedimiento anteriormente nombrado.
- **Secado por colgado o túnel.** Consiste en colgar las pieles y se utiliza principalmente para disminuir la humedad y algunos solventes que aún puedan estar impregnados en el cuero⁴⁸.
- **Desempolvado.** Es un procedimiento similar al sacudido, sin embargo, se debe tener en cuenta, que en éste, no debe quedar absolutamente ninguna parte de cuero sin desempolvar, ya que después de esto se laca el material para darle el brillo definitivo⁴⁹.
- **Medido.** Segmentación y delimitación del material ya listo.
- **Almacenado.** Cuero curtido, liso, cortado y listo para su posterior venta y/o entrega al cliente.

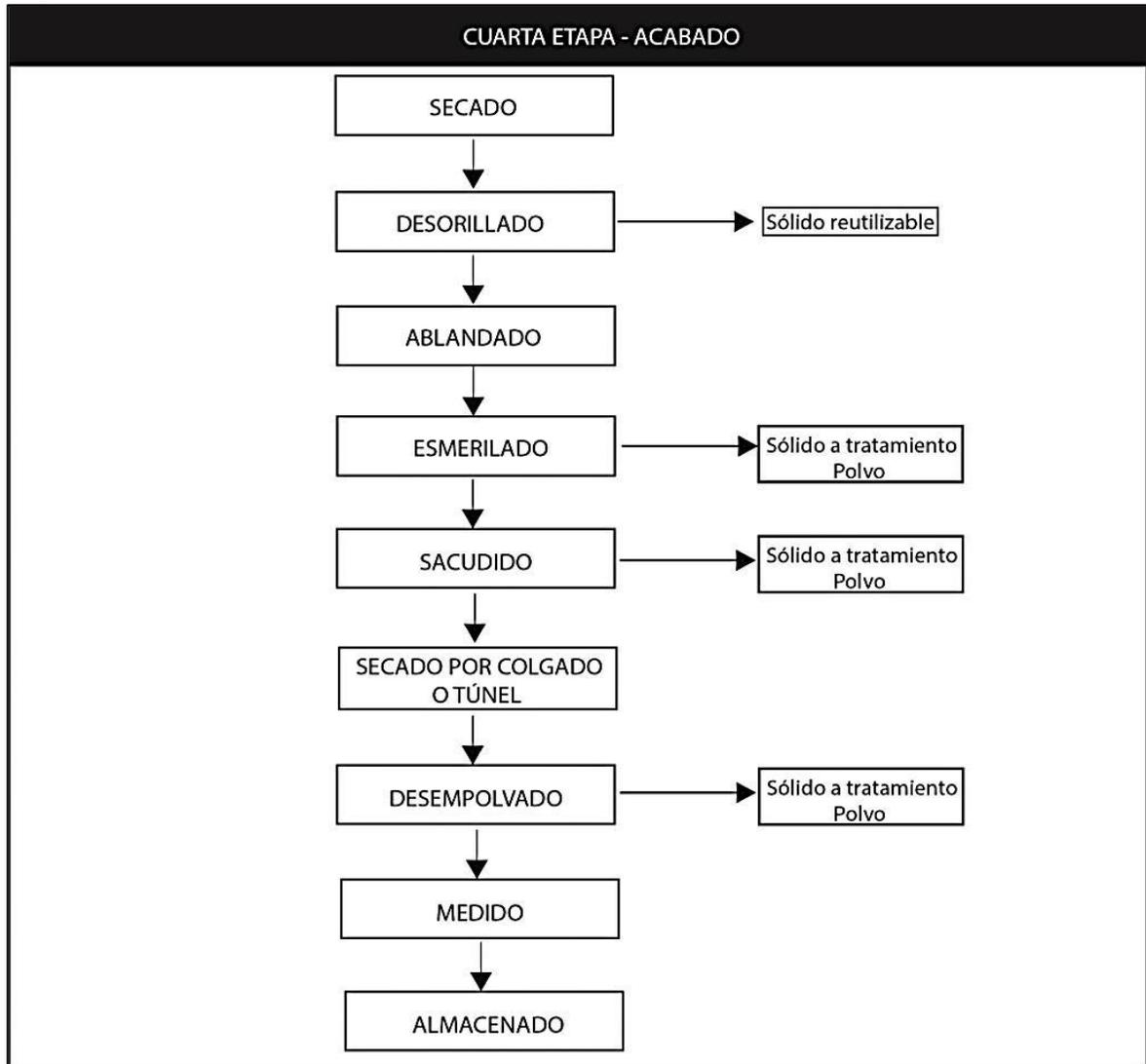
⁴⁶ VILLENA MOZO, Marco Antonio. Op. Cit., p. 14.

⁴⁷ Ibid., p. 16.

⁴⁸ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 33.

⁴⁹ CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique y CORTINAS DE NAVA, Cristina. Op. Cit., p. 38.

Figura 10. Cuarta etapa, acabado.



Fuente: CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique and CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. México D.F.: 1999. 32-55. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 35.

El otro 5% de la contaminación⁵⁰ a través de residuos líquidos está asociado a los últimos procesos de fabricación, y adecuación del cuero, la limpieza de la maquinaria, de los equipos y de las instalaciones en las cuales se lleva a cabo todo el proceso productivo. Debido al poco uso del agua durante las operaciones agrupadas en ésta etapa, no se generan volúmenes considerables de aguas residuales que aporten al efluente unificado que se vierte a las aguas superficiales.

⁵⁰ DIXIT, Sumita, *et al.* Op. Cit., p. 41.

En la Tabla 1, se muestran detalladamente las cantidades y/o concentraciones típicas de los contaminantes en las aguas residuales por cada una de las etapas del proceso (debido a su gran aporte, las etapas intermedias de Pelambre/encalado y Desencalado se extraen con el fin de poder percibir su contribución) de curtido para la producción de una tonelada de cuero; sin embargo, es importante resaltar, que esos datos que se encuentran recopilados, reflejan los rangos característicos que fueron unificados por el autor consultado, ya que fue una revisión de un estudio realizado a nivel mundial.

Tabla 1. Cantidad de agua residual y carga de contaminación generados por cada etapa durante el proceso de curtido de una tonelada de cuero.

| Carga contaminante | Carga de operaciones de procesamiento kg/tonelada de cuero | | | | | |
|---|--|-------------------|-------------|------------------|-----------|---------|
| | Remojo | Pelambre/encalado | Desencalado | Curtido al cromo | Recurtido | Acabado |
| Agua residual generada (m ³ o kilolitro) | 9 – 12 | 4 – 6 | 1,5 – 2 | 1 – 2 | 1 – 1,5 | 1 – 2 |
| Sólidos suspendidos (mg SST/L) | 11 – 17 | 53 – 97 | 8 – 12 | 5 – 10 | 6 – 11 | 0 – 2 |
| DQO (mg O ₂ /L) | 22 – 33 | 79 – 122 | 13 – 20 | 7 – 11 | 24 – 40 | 0 – 5 |
| DBO ₅ (mg O ₂ /L) | 7 – 11 | 28 – 45 | 5 – 9 | 2 – 4 | 8 – 15 | 0 – 2 |
| Cromo (mg Cr/L) | – | – | – | 2 – 5 | 1 – 2 | – |
| Sulfuros (mg S ²⁻ /L) | – | 3,9 – 8,7 | 0,1 – 0,3 | – | – | – |
| NH ₃ -N (mg NH ₃ /L) | 0,1 – 0,2 | 0,4 – 0,5 | 2,6 – 3,9 | 0,6 – 0,9 | 0,3 – 0,5 | – |
| Nitrógeno total Kjeldahl (mg N/L) | 1 – 2 | 6 – 8 | 3 – 5 | 0,6 – 0,9 | 1 – 2 | – |
| Cloruros (mg Cl ⁻ /L) | 85 – 13 | 5 – 15 | 2 – 4 | 40 – 60 | 5 – 10 | – |
| Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L) | 1 - 2 | 1 - 2 | 10 - 26 | 30 – 55 | 10 - 25 | – |

Fuente: DIXIT, Sumita, *et al.* Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. En: Journal of Cleaner Production. Enero 2014, p. 40.

De igual manera, se puede concluir que los procesos que generaron mayor carga contaminante en su agua de residuo, fueron los pertenecientes al remojo, pelambre/encalado y curtido; sin embargo, para el caso de estudio del presente

documento, la descarga se hace en un solo punto, lo que quiere decir, que se recolectan los efluentes líquidos generados de cada una de las etapas del proceso productivo, para luego realizar un solo vertimiento al cuerpo de agua.

1.3 NORMATIVIDAD

Todos los sectores de la economía tienen entradas y salidas de su proceso productivo, generalmente las salidas están compuestas por producto terminado, subproductos y desechos⁵¹, estos desechos son dispuestos y/o liberados al ambiente, generando problemáticas a corto, mediano o largo plazo. Los desechos líquidos, también llamados vertimientos, son descargados en los cuerpos de agua superficiales cercanos al sitio de su generación, y en algunos casos son tratados previamente por una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (P.T.A.R.I.) con el fin de cumplir con la regulación ambiental para vertimientos vigente en el territorio colombiano.

Para llevar a cabo el control de los vertimientos industriales a un cuerpo de agua receptor o al alcantarillado público, la legislación colombiana establece un conjunto de normativas que regulan y sancionan a quienes incumplan con éstas. En esta normatividad, se disponen límites máximos permisibles de parámetros seleccionados por la autoridad ambiental para descargas de aguas residuales de las actividades productivas del país y además, la disposición de criterios de calidad para determinar la afectación de los vertimientos a los cuerpos de agua receptores⁵².

1.3.1 Decreto 3930 de 2010. El presente decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Aplica a las autoridades ambientales competentes, a los generadores de vertimientos y a los prestadores del servicio público domiciliario de alcantarillado.

Según el Artículo 42 del Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010: requisitos del permiso de vertimientos, el interesado en solicitar dicho permiso ante la autoridad ambiental, deberá presentar ante esta entidad, una solicitud por escrito que contenga el cumplimiento de 23 ítems, entre los cuales se destaca el de la evaluación ambiental del vertimiento⁵³, es decir, qué tanto afecta dicho vertimiento al cuerpo de agua receptor de la descarga puntual.

⁵¹ HERRERA P, Andrés Mauricio. Ingeniería de Manufactura. Bogotá D.C.: 2017. p. 2.

⁵² VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 41.

⁵³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI –Parte III – Libro II del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos y de dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: Ministerio. p. 17.

En el Artículo 43: evaluación ambiental del vertimiento, del mismo decreto; se describe específicamente los requisitos mínimos que se deben cumplir, para que ésta evaluación sea válida en la solicitud del permiso de vertimientos ante la entidad ambiental reguladora, el cual debe ser solicitado por los generadores de vertimientos a cuerpos de agua o al suelo, que desarrollen actividades industriales, comerciales y de servicio. El numeral 5 dispuesto en el artículo previamente citado, establece como requisito, la predicción a través de modelos de simulación de los impactos que cause el vertimiento en el cuerpo de agua y/o suelo, en función de la capacidad de asimilación y dilución del cuerpo de agua receptor y de los usos y criterios de calidad establecidos por el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (P.O.R.H.). En el parágrafo 1 se hace la aclaración que, la modelación de que trata el presente artículo, deberá realizarse conforme a la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico⁵⁴ (G.N.M.R.H.).

Entre los criterios que se deben tener en cuenta al momento de aplicar algún modelo simulación de la calidad del agua, la norma fija la utilización de por lo menos los siguientes parámetros:

- DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco días.
- DQO: Demanda química de oxígeno.
- SST: Sólidos suspendidos totales.
- pH: Potencial del ion hidronio, H⁺.
- T: Temperatura.
- OD: Oxígeno disuelto.
- Q: Caudal.
- Datos Hidrobiológicos.
- Coliformes Totales y Coliformes Fecales.

Estos parámetros de calidad del agua, serán las variables de entrada que se deben tener en cuenta al momento de emplear un software que permita modelar la calidad del agua, es por esta razón que se deben tener los datos de monitoreo a lo largo de la fuente superficial donde se realizará la descarga del vertimiento industrial⁵⁵.

1.3.2 Resolución 0631 de 2015. Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público⁵⁶.

En la Tabla 2 se resumen los parámetros con sus respectivas unidades de medición y valores límite máximos permitidos por esta directriz que rige al territorio colombiano. La tabla completa se encuentra en el Anexo A.

⁵⁴ Ibid., p. 18.

⁵⁵ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 42.

⁵⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 De 2015. Op. Cit., p. 1.

Tabla 2. Valores límite máximos establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos provenientes del sector curtiembres.

| PARÁMETRO | UNIDADES | VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE |
|---|---------------------|---------------------------------------|
| Generales | | |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 200 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/LO ₂ | 50 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 50 |
| pH | Unidades de pH | 6 a 8,5 |
| Temperatura | °C | Diferencia menor a 5°C valor absoluto |
| Nutrientes | | |
| Fósforo Total (P) | mg/L | 1 |
| Compuestos de Nitrogenados | | |
| Nitratos (N-NO ₃) | mg/L | 5 |
| Iones | | |
| Sulfuros (S ²⁻) | mg/L | 1 |
| Metales y Metaloides | | |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,2 |

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio. p. 47.

1.3.3 Acuerdo 043 de 2006. Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020⁵⁷, dictados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. Discriminado según la cuenca del río, ya sea alta, media o baja e imponiendo límites máximos restrictivos de diferentes parámetros indicadores de la calidad del agua, desde los que son Clase I hasta los que son Clase V. Generando planes de saneamiento y manejo de vertimientos en todos los municipios ubicados en la cuenca del río Bogotá.

En ese orden de ideas, el agua procedente de la cuenca alta del río Bogotá corresponde a la Clase II⁵⁸: agua para consumo humano y doméstico con

⁵⁷ COLOMBIA. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Acuerdo 043 De 2006. Por el cual se establecen los objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. Bogotá. Consejo Directivo. p. 1.

⁵⁸ Ibid., p. 9.

tratamiento convencional, uso agrícola con restricciones y uso pecuario⁵⁹. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los valores máximos de las variables que corresponden a la clase a la que pertenece el afluente. La tabla completa se encuentre en el Anexo B.

Tabla 3. Valores límite máximos establecidos en el Acuerdo 043 de 2006 para vertimientos en aguas Clase II.

| PARÁMETRO | UNIDADES | VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE |
|--|----------|--------------------------------|
| Parámetros Orgánicos | | |
| Demanda Química De Oxígeno (DQO) | mg/L | 7 |
| Oxígeno Disuelto (OD) | mg/L | >4 |
| Parámetros Nutrientes | | |
| Nitratos (N-NO ₃) | mg/L | 10 |
| Sólidos | | |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 10 |
| Parámetros de Interés Sanitario | | |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,05 |
| pH | Unidades | 5 a 9 |

Fuente: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Acuerdo 043 De 2006. Por el cual se establecen los objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. Bogotá D.C.: Consejo Directivo. p. 6.

1.4 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

1.4.1 Conductividad eléctrica. Cuando se habla de la conductividad del agua, se hace referencia a la medición a nivel de laboratorio de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica a través de sí⁶⁰, la cual depende directamente de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición⁶¹.

El proceso productivo que se lleva a cabo en una curtiembre, emplea sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, sin embargo es importante mencionar que las primeras son menos conductoras de electricidad con respecto a las segundas⁶², ya

⁵⁹ Ibid., p. 6.

⁶⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuiquímica. Bogotá D.C. 1996. Escuela Colombiana de Ingeniería. p. 58.

⁶¹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Conductividad Eléctrica En Agua. 2006. p. 2.

⁶² Ibid., p. 3.

que su coeficiente de disociación es muy bajo y por lo tanto conducen la corriente a muy baja escala.

1.4.2 Cromo total. El cromo existe en la naturaleza generalmente como cromo metálico Cr^{++} , ion crómico Cr^{3+} y Cr^{6+} ; donde el más estable es el Cr^{3+} ⁶³. En aguas naturales su concentración es generalmente menor a 0,05 mg/L⁶⁴.

1.4.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO₅. Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas y aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días⁶⁵.

La demanda bioquímica de oxígeno es una medida que determina la cantidad aproximada de oxígeno disuelto que será utilizado para estabilizar biológicamente (oxidar⁶⁶) la materia orgánica biodegradable presente en el sistema, con microorganismos en condiciones aerobias⁶⁷.

Esta demanda se cuantifica a 20°C en un laboratorio controlado⁶⁸; dichas especificaciones de medición son de vital importancia y especial cuidado, ya que las reacciones que se llevan a cabo en el agua pueden verse afectadas por el incremento de temperatura, la disponibilidad de oxígeno disuelto y los nutrientes como nitrógeno y fósforo⁶⁹. El ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación, con valores numéricos expresados en mg/L de O₂.

1.4.4 Oxígeno Disuelto – OD. La importancia de la determinación de oxígeno disuelto se debe a que es el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular⁷⁰.

En la naturaleza, las aguas en su discurrir por los cauces naturales en ausencia de perturbaciones artificiales o de la intervención del hombre, alcanzan concentraciones de oxígeno disuelto próximo a la saturación⁷¹, pero esta no es la

⁶³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del agua. Escuela Colombiana de ingeniería. Bogotá. 2009. p. 356.

⁶⁴ Ibid., p. 384.

⁶⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuíquímica. Op. Cit., p. 107.

⁶⁶ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. p. 38.

⁶⁷ TCHOBANOGLOUS, George y TRILLO MONTSORIU, Juan de Dios. Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación Y Reutilización De Aguas Residuales. Barcelona: Editorial Labor, 1994. p. 93.

⁶⁸ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño. Op. Cit., p. 38.

⁶⁹ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. cit., p. 48.

⁷⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuíquímica. Op. Cit., p. 106.

⁷¹ GIL RODRÍGUEZ, Manuel. Procesos De Descontaminación De Aguas: Cálculos Informatizados Avanzados. España: Thomson Editores, 2005. p. 47.

única forma de aportar oxígeno en este sistema hídrico, debido a que ocurren otros procesos como la fotosíntesis, oxidación-reducción, solubilidad de minerales y la descomposición de materia orgánica⁷².

La concentración de saturación de oxígeno disuelto es función de la temperatura, de la presión atmosférica y de la pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos, etc.)⁷³. La baja disponibilidad de OD limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua⁷⁴.

El oxígeno disuelto se considera el fundamento de cuantificación, medida y cálculo de la DBO, ya que evalúa las condiciones de aerobividad del agua⁷⁵ y de esa manera se puede determinar el grado de contaminación del cuerpo hídrico a la altura del tramo en que se tome la muestra.

1.4.5 pH. Es la medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua, se conoce más específicamente como la medida del ion hidrógeno en el agua, expresada como el antilogaritmo de la concentración molar de dicho ion⁷⁶.

El tratamiento del agua tiene relación estrecha con este parámetro, de manera particular si en la PTAR se emplean procesos biológicos, debido a que esta variable debe estar en un intervalo favorable para los microorganismos que en ella habitan⁷⁷.

1.4.6 Sólidos Suspendidos Totales – SST. Se entiende como sólido a toda la materia que se encuentre en el material líquido, exceptuando al agua⁷⁸. Los sólidos suspendidos son el residuo no filtrable o material no disuelto⁷⁹ del agua en cuestión.

1.4.7 Temperatura. La temperatura es un parámetro importante en el estudio de las aguas residuales por su efecto sobre las características del agua como las operaciones y procesos de tratamiento⁸⁰, los cálculos de balance energía de los procesos industriales como el de la curtiduría y el método de disposición final ya sea a un cuerpo superficial de agua o al alcantarillado. La temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto, la

⁷² VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p.46

⁷³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Op. Cit., p. 64.

⁷⁴ Ibid., p. 64.

⁷⁵ Ibid., p. 64.

⁷⁶ Ibid., p. 66.

⁷⁷ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 49.

⁷⁸ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Calidad del agua. Op. Cit., p. 111.

⁷⁹ Ibid., p. 112.

⁸⁰ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Op. Cit., p. 70.

densidad y viscosidad del agua (por lo tanto, afecta a los procesos de sedimentación), la velocidad de reacciones químicas y de la actividad bacteriana⁸¹.

El método normalizado para determinar el valor de la temperatura implica llevar a cabo la medición en el lugar donde se encuentra el agua⁸², dicha medición fue realizada por las estaciones fijas de monitoreo que se encuentran a lo largo del cauce del río jurisdicción CAR Cundinamarca. Este es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable (<40°C)⁸³.

1.5 CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA

Empresa cuya sede principal se encuentra ubicada en el municipio de Villapinzón, al norte del departamento de Cundinamarca⁸⁴ y a 5 km del nacimiento del río Bogotá, en el Páramo de Guacheneque.

Esta compañía tiene una capacidad de procesamiento aproximado mensual de 20000 pieles.

Se sabe que la piel cruda es un subproducto de la industria cárnica y cuando ésta llega a la planta pesa entre 25 y 30 kg⁸⁵, ya que depende de la raza del animal y de si está fresca o conservada con alguna sal. Después de curtida, la piel pasa a llamarse cuero⁸⁶ y pesa entre 12 y 20 kg, esto depende del proceso de curtido, recurtido, acabado y de los requisitos específicos del cliente.

De acuerdo con la guía ambiental para la industria del curtido y preparado de cueros, el volumen de agua que se consume a lo largo de todo el proceso, es de 15 a 40 m³ por cada tonelada de piel fresca que entra a la planta⁸⁷.

⁸¹ Ibid., p. 70.

⁸² VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 47.

⁸³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio. p. 8.

⁸⁴ Alcaldía de Villapinzón - Cundinamarca. *Nuestro municipio*. [Consultado el 30 de noviembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/A94MRe>

⁸⁵ REBAK, Gladis I.; CAPELLARI, Adriana y REVIDATTI, María A. Peso Y Rendimiento De Subproductos Incomestibles Y Cuero Resultantes De La Faena De Novillos De 22 a 24 Meses, 3/8 Y 5/8 Cebú X Hereford, Tipo Cebú Y Tipo Hereford Del Noreste De Corrientes. Universidad Nacional del Nordeste. 2003. p. 2.

⁸⁶ SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Op. Cit., p. 25.

⁸⁷ Ibid., p. 45.

1.6 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES – P.T.A.R.I.

Generalmente las curtiembres poseen una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (P.T.A.R.I.) para tratar los residuos líquidos que salen contaminados de todas las etapas del proceso productivo que se lleva a cabo en la empresa.

Para el ingreso de las aguas a la planta, se separan de las demás, a las que vienen de la primera etapa conocida como ribera, debido a que éstas poseen altos contenidos de sulfuro de sodio y materia orgánica, y por lo tanto deben ser desulfuradas en un sistema de oxidación catalítica, precedido de una serie de trampas de grasa y tamices, los cuales se encargan de la eliminación de impurezas de gran tamaño que se encuentren en estas aguas, como lo son el pelo.

Después de la desulfuración, las aguas que venían de la ribera son enviadas a un tanque de homogeneización, donde se mezclan con la corriente de aguas residuales del resto de las etapas del proceso productivo; aguas que corresponden a cada una de las salidas de las etapas de remojo, desencalado, curtido, recurtido, teñido, bodegas y acabado, respectivamente.

Después de pasar por el tanque de homogeneización de aguas residuales, éstas se llevan a las dos últimas etapas de tratamiento dentro de la P.T.A.R.I., conocidas como tratamiento primario (coagulación, floculación, sedimentación, ajuste de pH⁸⁸; los cuales se llevan a cabo en dos tanques de reacción paralelos) y tratamiento secundario (tratamiento por lodos activados microbiológicamente⁸⁹). De esta manera, las aguas residuales tratadas de la curtiembre, pueden ser descargadas directamente al río Bogotá.

1.6.1 Pozo de recepción. Todos los residuos de carácter líquido que son generados en los procesos intermedios de la primera etapa conocida como ribera, se reúnen en un tanque de almacenamiento, que sirve como unidad de bombeo. Estas aguas residuales reciben un pretratamiento antes de ingresar a la P.T.A.R.I. debido a sus características químicas particulares.

1.6.2 Tanque de oxidación catalítica. Es el sitio donde se lleva a cabo el proceso de la oxidación catalítica dentro de la planta, cuenta con un equipo de suministro de aire mediante inyección a través de turbinas⁹⁰, esto con el fin de evitar los malos

⁸⁸ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Op. Cit., p. 140.

⁸⁹ Ibid., p. 140.

⁹⁰ TCHOBANOGLIOUS, George y TRILLO MONTSORIU, Juan de Dios. Op. Cit., p. 364.

olores producidos a raíz de la reducción de pH (cuando el sulfuro de sodio reacciona y pasa a formar ácido sulfhídrico).

El proceso catalítico cuenta con un catalizador de sulfato de manganeso (usualmente se utiliza monohidratado por razones económicas), el cual entra al sistema en forma de solución.

El agua que sale de este proceso de oxidación catalítica, después de haber sido separada del lodo, es llevada directamente al tanque de homogeneización en el cual se juntan todas las aguas residuales industriales que son generadas a lo largo del proceso productivo de la curtiembre.

1.6.3 Homogeneización. Es el tanque dispuesto para realizar la homogeneización de todas las aguas efluentes dentro de la planta; también es el encargado de regular los caudales y las cargas de las aguas residuales que vienen de la desulfuración de la ribera y de las demás etapas del proceso productivo⁹¹.

1.6.4 Tratamiento primario. Cuando se habla del tratamiento primario, se hace referencia a el procedimiento mediante el cual se le es removida parcialmente la carga de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos al agua residual, mediante sedimentación u otros métodos⁹² tanto físicos como químicos. Por lo regular, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35 a 40% de la DBO⁹³.

Después de un pretratamiento y un ajuste de pH, el tratamiento primario en la curtiembre se lleva a cabo en dos tanques paralelos a los cuales se les adicionan coagulantes y floculantes según los análisis previos hechos a nivel de laboratorio⁹⁴, los cuales son causantes de la sedimentación de los *flock* (aglomeraciones de los sólidos suspendidos que se encuentran en el seno del fluido⁹⁵) que se generan por la inestabilidad química que producen estas sustancias.

1.6.5 Tratamiento secundario. Según la teoría, el tratamiento secundario se usa básicamente para la remoción de la DBO soluble y de los sólidos suspendidos que se encuentran expresados por medio de la materia orgánica biodegradable⁹⁶ latente

⁹¹ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 44.

⁹² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Op. Cit., p. 130.

⁹³ Ibid., p. 130.

⁹⁴ Ibid., p. 1093.

⁹⁵ Ibid., p. 140.

⁹⁶ DIAZ VARGAS, Chrispy Alexander y VARGAS BORDA, Oscar Andrés. Ingeniería Básica De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De La Curtiembre Distriequinos La Herradura. Fundación Universidad de América, 2009. p. 56.

en la muestra que viene del tratamiento primario⁹⁷. Éstas remociones incluyen procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación⁹⁸. Un tratamiento secundario típico remueve aproximadamente el 85% de la DBO y los SST⁹⁹. Las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos¹⁰⁰.

El clarificado del tanque de sedimentación pasa a un tratamiento con bacterias aerobias en un tanque rectangular de fondo plano de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, el cual basa su funcionamiento en proporcionar un contacto íntimo entre el agua y los lodos microbiológicamente activos.

Los lodos se cultivan inicialmente con una aireación prolongada que varía de 0,7 a 1,4 veces la cantidad de DBO₅ eliminada¹⁰¹ en condiciones de presión, concentración y temperatura controladas, que favorecen al crecimiento de los microorganismos, los cuales cuentan con la facilidad de oxidar la materia orgánica presente en el agua. Cuando estos lodos que contienen una alta carga microbiana (la cual es diferente entre cada empresa, debido a que cada empresa usa sustancias químicas y materias primas diferentes a lo largo de su proceso productivo) entran en contacto con el agua, la materia orgánica presente en ella, se oxida; dejando así el agua lista para ser vertida en un alcantarillado o para ser directamente descargada en un cuerpo de agua superficial receptor¹⁰², para este caso en particular, el río Bogotá. A la hora de llevar a cabo la modelación de la calidad del agua, se deben tener mínimo tres grupos de datos en cuenta, los cuales son indispensables para tal cometido: los parámetros de calidad del vertimiento de la empresa, los datos para el cuerpo de agua superficial y los parámetros tanto de aguas arriba, como de aguas abajo de la descarga puntual; para este caso en particular, sobre el río Bogotá. Esta última información es proporcionada por la autoridad ambiental que jurisdicción en el área de influencia del vertimiento, para este caso es la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, mediante su red de monitoreo a lo largo de la cuenca del afluente.

⁹⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Op. Cit., p. 1098.

⁹⁸ Ibid., p. 130.

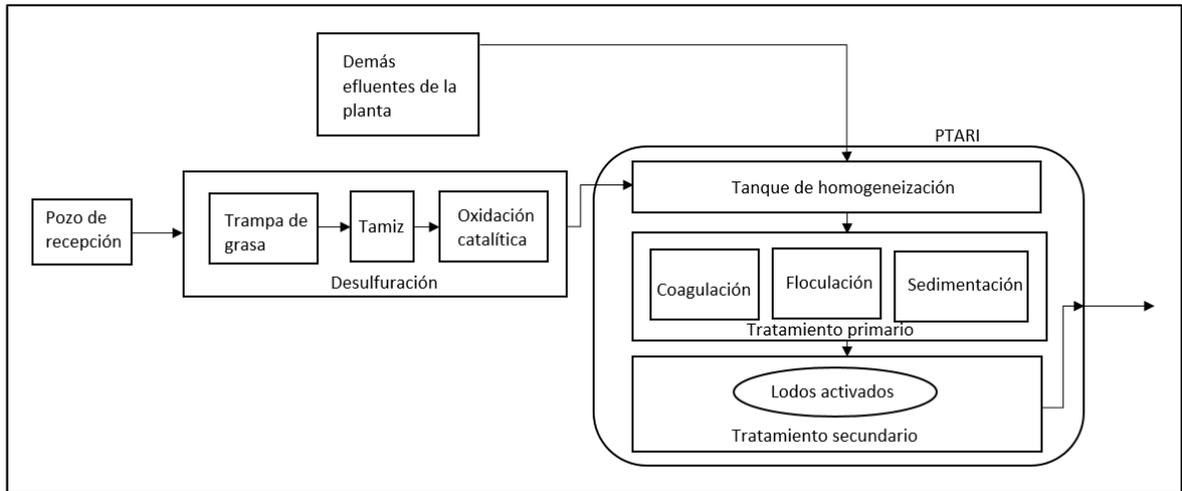
⁹⁹ Ibid., p. 1098.

¹⁰⁰ Ibid., p. 61.

¹⁰¹ TCHOBANOGLOUS, George y TRILLO MONTSORIU, Juan de Dios. Op. Cit., p. 577.

¹⁰² VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 45.

Figura 11. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua.



Fuente: Elaboración propia. Basado en datos confidenciales de la empresa curtiembre.

2. SELECCIÓN DE VARIABLES

Según la legislación ambiental vigente en el territorio colombiano, se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público para actividades industriales, comerciales y del sector servicios¹⁰³; de igual manera, los requerimientos del permiso de vertimientos¹⁰⁴, junto con los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá al año 2020¹⁰⁵.

Cada una de estas directrices, ayuda a delimitar y elegir las variables que se utilizarán para llevar a cabo la modelación de la calidad del recurso hídrico; es por esto que en el presente capítulo se presentarán las variables que se tendrán en cuenta, haciendo hincapié en las que se encuentran disponibles en la información otorgada por parte de las estaciones fijas de monitoreo sobre el río, jurisdicción CAR Cundinamarca y se encuentran en el tramo de estudio.

2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE VARIABLES

La selección de las variables significativas para la simulación de calidad del agua producida en un proceso de curtido de pieles se debe atacar desde diferentes frentes, debido a que está limitada por estos.

2.1.1 Técnicos. Para seleccionar las variables de manera adecuada, se deben tener en cuenta las variables que son usadas en los modelos de calidad de agua para simular fuentes superficiales de agua como los ríos. Por otra parte, se deben tener en cuenta la facilidad y disponibilidad de recolección de datos, ya que entre más específico sea el dato (ya sea de carácter hidrobiológico, físico o químico), más difícil y costoso será el hecho de poder conseguirlo, ya que esto requiere de personal y equipos especializados, los cuales generalmente se encuentran en las estaciones de monitoreo.

2.1.2 Normativos. Las variables que se van a seleccionar, deben estar contempladas en la legislación colombiana y deben presentar límites máximos para vertimientos de carácter industrial, tal cual como se presentó en la sección 1.3.

2.1.3 Procedimentales. Se debe tener en cuenta el proceso productivo principal de la empresa, ya que éste nos ofrece *a priori* los parámetros de calidad del agua

¹⁰³ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. Op. Cit., p. 1.

¹⁰⁴ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010. Op. Cit., p. 1.

¹⁰⁵ COPORACIÓN AUTONÓMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Acuerdo 043 de 2006. Op. Cit., p. 1.

que se ven afectados durante la transformación de piel animal a cuero, ya que en este tratamiento se producen vertimientos con altas cargas orgánicas (explicado en la sección 1.2) que afectan directamente a la calidad del agua, representados en DBO, OD, SST; vertimientos con presencia de cromo y sulfuros; y vertimientos con pH y temperatura diferentes a los que tendría el agua del cuerpo de agua receptor.

Teniendo en cuenta la delimitación del sistema, la cual está propuesta desde un principio; se tendrán en cuenta tres puntos principales: Aguas arriba (estación Aguas arriba Villapinzón zona rural), aguas abajo (estación Río Tejar) y el vertimiento (efluente de la empresa curtiembre) en forma de descarga puntual, el cual para efectos de la modelación se puede considerar como un tributario, ya que es una corriente de agua que entra al sistema a tratar.

2.2 RED DE MONITOREO DEL RÍO BOGOTÁ

El río Bogotá cuenta con 81 estaciones de monitoreo de la calidad del agua a lo largo de su cauce¹⁰⁶, las cuales junto con las quebradas que en él desembocan conocidas como tributarios, componen una red de control y seguimiento con el fin de la recuperar el cuerpo hídrico de acuerdo con los objetivos propuestos para cumplir en el año 2020 en el Acuerdo 043 de 2006.

En cada una de las estaciones de monitoreo se llevan a cabo diferentes mediciones de parámetros que están relacionados con la calidad del agua, las cuales básicamente son pruebas de análisis fisicoquímico del agua a nivel de laboratorio.

En el Cuadro 1 se nombran las estaciones del cauce principal del río en el orden que se encuentran ubicadas conforme va avanzando el río a través del departamento, desde su nacimiento en el Páramo de Guacheneque hasta su desembocadura en el río Magdalena a la altura del municipio de Girardot.

¹⁰⁶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Boletín calidad hídrica 2014: Informe de seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad. Bogotá D.C. 2015. p. 32.

Cuadro 1. Nombre de las estaciones de monitoreo de la calidad del agua de la cuenca alta del río Bogotá.

| Nombre | Abscisado |
|--------------------------------|------------------|
| Aguas arriba Villapinzón | K0+000 |
| Puente Villapinzón | K4+146 |
| Aguas arriba Q. Quincha | K4+506 |
| Q. Quincha | K4+886 |
| Estación LM Chingacio | K7+842 |
| Río Tejar | K16+810 |
| Aguas abajo municipio Chocontá | K19+260 |
| Estación LG Saucio | K24+840 |

Fuente: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Boletín de calidad hídrica: Informe de seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad. Bogotá D.C. 2015. p. 30.

Las estaciones de monitoreo que fueron seleccionadas para delimitar el sistema, corresponden a las ubicaciones aguas arriba (Aguas arriba Villapinzón) y aguas abajo (Río Tejar) de la descarga puntual del vertimiento efluente de la curtiembre en el río, las cuales cuentan con los equipos y el personal autorizado para llevar a cabo las tomas de muestras dos veces al año y realizar los análisis de calidad del agua pertinentes.

2.2.1 Aguas arriba Villapinzón. Es la primera estación de la red de monitoreo de calidad del agua del río Bogotá¹⁰⁷, por ende, se toma como punto de partida (km 0) para medir la distancia de las demás estaciones de la red sobre el cauce del río. Se encuentra ubicada en la zona rural del municipio de Villapinzón, al norte del departamento de Cundinamarca; más específicamente antes de que el cauce del río pase por el municipio en el cual tiene sede la curtiembre en cuestión.

Al estar situada tan cerca del nacimiento del río, es una estación en la cual el agua no se encuentra afectada por la actividad humana ya que se encuentra en un área de protección.

Para efectos de georreferenciación, la estación se localiza en las coordenadas: 5° 14' 21,3" Norte y 73° 35' 2,4" Occidente.

2.2.2 Río Tejar. Es la sexta estación de la red de monitoreo de calidad del agua del río Bogotá y se encuentra a 16.81 km del nacimiento del río¹⁰⁸ en la zona rural del municipio de Chocontá, al norte del departamento de Cundinamarca; más específicamente después de que el cauce del río pase por el municipio en el cual tiene sede la curtiembre en cuestión.

¹⁰⁷ Ibid., p. 30.

¹⁰⁸ Ibid., p. 30.

Se caracteriza por ser una corriente contaminada por los vertimientos indiscriminados de las curtiembres de Villapinzón, por lo tanto, posee altos niveles de materia orgánica, sólidos suspendidos, olores ofensivos, entre otros; siendo esto fiel evidencia del pobre cumplimiento de los objetivos de calidad del agua propuestos por la CAR en 2006, haciendo importante el análisis del impacto que genera el vertimiento de una curtiembre al río Bogotá.

Para efectos de georreferenciación, la estación se localiza en las coordenadas: 5° 09' 39,6" Norte y 73° 40' 22,9" Occidente.

2.3 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para el caso de la modelación de la calidad del agua del río Bogotá, se requieren los datos que son obtenidos por la autoridad ambiental, y los análisis de la calidad del agua que salen del proceso productivo, realizados dentro de la curtiembre.

Como previamente se explicó, los límites que se establecen en la legislación ambiental vigente en el territorio colombiano son de obligatorio cumplimiento, y son estos los que dictan si la descarga puntual del vertimiento está o no afectando negativamente al cuerpo de agua superficial receptor.

En el Decreto 3930 de 2010 se establecen nueve variables que se deben tener en cuenta con el fin de cumplir con el permiso de vertimientos y determinar la capacidad que tiene el río para: diluir sustancias no biodegradables y para asimilar las sustancias biodegradables. En la Resolución 0631 de 2015 se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles para descargas puntuales provenientes del sector curtiembres, a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Por último, en el Acuerdo 043 de 2006 se proponen los objetivos de recuperación del río Bogotá para el año 2020, discriminado según la cuenca del río, ya sea alta, media o baja e imponiendo límites máximos restrictivos de diferentes parámetros indicadores de la calidad del agua, desde los que son clase I hasta los que son clase V; generando planes de saneamiento y manejo de vertimientos en todos los municipios ubicados en la cuenca del río Bogotá.

La modelación se verá limitada si no se cuenta con la información completa de cada una de las variables de entrada del modelo, para así poder realizar una simulación de la calidad del agua que represente adecuadamente el comportamiento de todos los contaminantes a estudiar. Es por esto que se procede a plantear suposiciones de acuerdo con el recurso hídrico que se desea simular y al software que se utilice como herramienta para la modelación¹⁰⁹.

¹⁰⁹ Ibid., p. 53.

Basándose en los reportes de las estaciones de monitoreo y los análisis fisicoquímicos del vertimiento de la PTARI al río; los parámetros/variables requeridos/que se van a tener en cuenta en este documento para determinar la afectación del cuerpo hídrico son: la conductividad eléctrica, el cromo total, la DBO₅, la DQO, el fósforo orgánico, el fósforo inorgánico, el nitrógeno orgánico, los nitratos, los iones de amonio, el oxígeno disuelto, el pH, los sólidos suspendidos totales, la alcalinidad, los sulfuros y la temperatura.

2.3.1 Calidad del agua del receptor. A lo largo y ancho del territorio colombiano, se puede apreciar fácilmente la contaminación del recurso hídrico, más específicamente la contaminación de los ríos. Esto se debe a que los ríos son utilizados como receptores de las aguas de los caños y desagües tanto de los hogares, como de las industrias, presentando propiedades como mal olor, turbidez, sólidos suspendidos, sedimentos, entre otros factores que traen consigo una contaminación del recurso hídrico, los suelos y el aire.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros fisicoquímicos tabulados para el río Bogotá en sus estaciones Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar.

Tabla 4. Calidad del agua del río Bogotá en las estaciones de monitoreo Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar pertenecientes a la CAR Cundinamarca.

| Estación | Unidades | Aguas arriba | | Aguas abajo | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|-------------|-----------|
| | | Aguas arriba Villapinzón | | Río Tejar | |
| | | 2017-01 | 2016-02 | 2017-01 | 2016-02 |
| Campaña | | | | | |
| Fecha | | | | | |
| Parámetro | | 16-ene-17 | 15-sep-16 | 17-ene-17 | 20-sep-16 |
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | 7,2 | 5,0 | 8,7 | 6,7 |
| Caudal | L/s | 82,7 | 498 | 57,6 | 378,9 |
| Coliformes totales | UFC/100mL | 9800 | 2400 | 7300 | 4100 |
| Conductividad | μS/cm | 21,6 | 10,6 | 25,5 | 17,4 |
| Cromo total | μg Cr/L | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg O ₂ /L | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Demanda Química de Oxígeno | mg O ₂ /L | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 13,8 |
| E-Coli | UFC/100mL | 440 | 870 | 100 | 120 |
| Fósforo Inorgánico | mg P/L | 0,036 | 0,02 | 0,011 | 0,01 |
| Fósforo Orgánico | mg P/L | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| Nitratos | mg NO ₃ /L | 0,1 | 0,161 | 0,254 | 0,408 |
| Nitrógeno Amoniacal | mg NH ₃ /L | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Nitrógeno Orgánico | mg N/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | 6,5 | 6,9 | 3,5 | 6,6 |
| pH | unidades de pH | 6,7 | 6,6 | 6,5 | 6,5 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg SST/L | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 9,2 |
| Sulfuros | mg S ⁼ /L | 2,0 | 3,8 | 2,8 | 2,0 |
| Temperatura del agua | °C | 12,1 | 11,8 | 16,4 | 13,3 |
| Turbidez | UNT | 4,3 | 2,5 | 7 | 6,9 |

Fuente: CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Parámetros de calidad del agua del río Bogotá. Mosquera. 2017.

2.3.2 Calidad del agua del proceso. De los vertimientos generados en una curtiembre, aproximadamente el 65%¹¹⁰, se producen en los procesos intermedios que comprenden la ribera, sin embargo estos líquidos son procesados junto con los demás vertimientos generados a lo largo del proceso, en la PTARI; por último se analiza la calidad del agua con el fin de verificar la reducción de parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad del agua, en relación a los establecidos por la Resolución 0631 de 2015 (recopilados en la Tabla 5) antes de ser vertida al cuerpo de agua receptor, en este caso particular, el río Bogotá.

Tabla 5. Calidad del agua a la salida de la PTARI de la empresa a marzo de 2018.

| Parámetro | Unidades | Resultados | Resolución 0631 de 2015 |
|-------------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | 552 | - |
| Caudal | L/s | 0,55 | - |
| Conductividad | μS/cm | 1289 | - |
| Cromo Total | μg Cr/L | 20,0 | Cumple |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg O ₂ /L | 63,0 | No cumple* |
| Demanda Química de Oxígeno | mg O ₂ /L | 86,0 | No cumple |
| Fósforo Inorgánico | mg P/L | 1,62 | - |
| Fósforo Orgánico | mg P/L | 1,94 | No cumple |
| Nitratos | mg NO ₃ /L | 28,7 | No cumple |
| Nitrógeno Amoniacal | mg NH ₃ /L | 1,59 | Cumple |
| Nitrógeno Orgánico | mg N/L | 39,8 | - |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | 5,6 | Cumple* |
| pH | unidades de pH | 8,05 | Cumple |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg SST/L | 30,0 | Cumple |
| Sulfuros | mg S ²⁻ /L | 1,29 | No cumple |
| Temperatura del agua | °C | 21,4 | - |
| Turbidez | UNT | 6 | - |

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos confidenciales de la empresa curtiembre.

El * hace referencia a los valores límites máximos establecidos en el Acuerdo 043 de 2006 para vertimientos de agua Clase II.

Por lo que se puede concluir *a priori* que a pesar de que la empresa curtiembre cuente con una PTARI, no es suficiente para depurar las aguas de residuo de su proceso

¹¹⁰ ARANGO ESCOBAR, Carlos Alberto; ARAGÓN GUZMÁN, Mónica y ALZATE TEJADA, Adriana María. Op. Cit., p. 17.

industrial, con el fin de que no afecte negativamente a la fuente superficial donde se descarga, para este caso es el río Bogotá.

3. MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

El sector de las curtiembres posee un problema ambiental serio¹¹¹, el cual se basa en que tiene una imagen negativa en la sociedad debido a que los residuos líquidos que se generan a lo largo de este proceso productivo, son considerados altamente contaminantes a pesar de que no se tiene en cuenta que el proceso de transformación que ocurre dentro de la planta curtidora, tiene como materia prima a un subproducto de la industria cárnica, el cual se caracteriza por su susceptibilidad a la descomposición y su bajo potencial de biodegradación.

Según el Departamento de Medio Ambiente de Malasia (DOE), muchos ríos están experimentando una pérdida de calidad, que a su vez afecta la salud de las personas, la economía del país y el medio ambiente¹¹². Es por esto que nace la necesidad de implementar modelos de simulación de calidad del agua, los cuales permitan determinar el impacto que causa el vertimiento en particular, al cuerpo de agua receptor (evaluación ambiental del vertimiento).

3.1 DEFINICIÓN DE MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

Se considera modelo de calidad del agua, al conjunto de simplificaciones matemáticas y algoritmos por medio de los cuales se representa un sistema real, basado en una serie de aproximaciones con una tolerancia asociada al método que se utilice¹¹³.

Las diferentes etapas que comprenden el proceso mediante el cual se transforma la piel de los animales en cuero, generan principalmente residuos de naturaleza líquida, los cuales afectan negativamente la calidad del agua de la corriente receptora. Un sistema real, puede ser el proceso mediante el cual se predice la calidad del agua de una fuente superficial o de otro cuerpo de agua receptor, después de ser afectada por el vertimiento generado en un proceso de curtido de pieles.

El hecho de que ayude a la toma de decisiones que lleven al favorecimiento del desarrollo sostenible, instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales y planes de saneamiento; hace que los modelos de calidad del agua sean importantes a la hora de llevar a cabo la evaluación ambiental del proceso.

¹¹¹ SOKOLOV, Seguei y BLACK P, Kerry. Modelling the evolution of water-quality parameters in a river: Yarra River, Australia. En: Journal of Hydrology. Abril 1995. p. 311.

¹¹² NAJAH, *et al.* Application of artificial neural network for quality prediction. En: Neural Computing and Applications. Abril 2012. p. 187.

¹¹³ *Ibid.*, p. 187.

Para la modelación de la calidad del agua, se hace necesario seleccionar un modelo o programa computacional¹¹⁴; para efectos del presente documento se entenderá por modelo, al software en toda su magnitud¹¹⁵.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

Debido a que para que un modelo de calidad del agua se pueda aplicar, se deben tener en cuenta que en cada país hay diferentes tipos de sistemas y de normativas que rigen a los cuerpos de agua superficiales, se debe conocer cómo se agrupan estos modelos a nivel internacional, los cuales han sido desarrollados por grupos de investigación y agencias especializadas en el tema. Si se logra comprender cómo es esta clasificación de los modelos, se podría llegar a seleccionar el que más se ajuste a las necesidades particulares del sistema a tratar y a la problemática que se quiere abarcar mediante la simulación de la calidad del agua.

Actualmente los modelos se agrupan y diferencian a partir de algunas características como lo son: el tipo de recurso hídrico o cuenca que se va a modelar, el tipo de proceso para el que fue creado, el número de dimensiones que se tienen en cuenta, el propósito con que se utiliza el modelo, su variabilidad o no variabilidad con respecto al tiempo, su descripción de los procesos intermedios, su manejo de datos ya sean datos obtenidos por mediciones observadas o distribuciones estadísticas y una de las más importantes, la disponibilidad de la información¹¹⁶.

3.2.1 Según la fuente superficial de agua. Los modelos de calidad del agua para fuentes superficiales pueden dividirse como se muestra en la Figura 12. Los creadores de estos modelos buscan que la utilización de estos sea descentralizada y universal, es decir que puedan ser fácilmente manipulados para cualquier tipo de necesidad y en cualquier tipo de escenario; pero debido a que existen gran cantidad de posibles variaciones en las características propias de los ambientes considerados como sistemas, se han logrado agrupar modelos de calidad enfocados a las aguas superficiales más comunes, como lo son los estuarios, los lagos y los ríos.

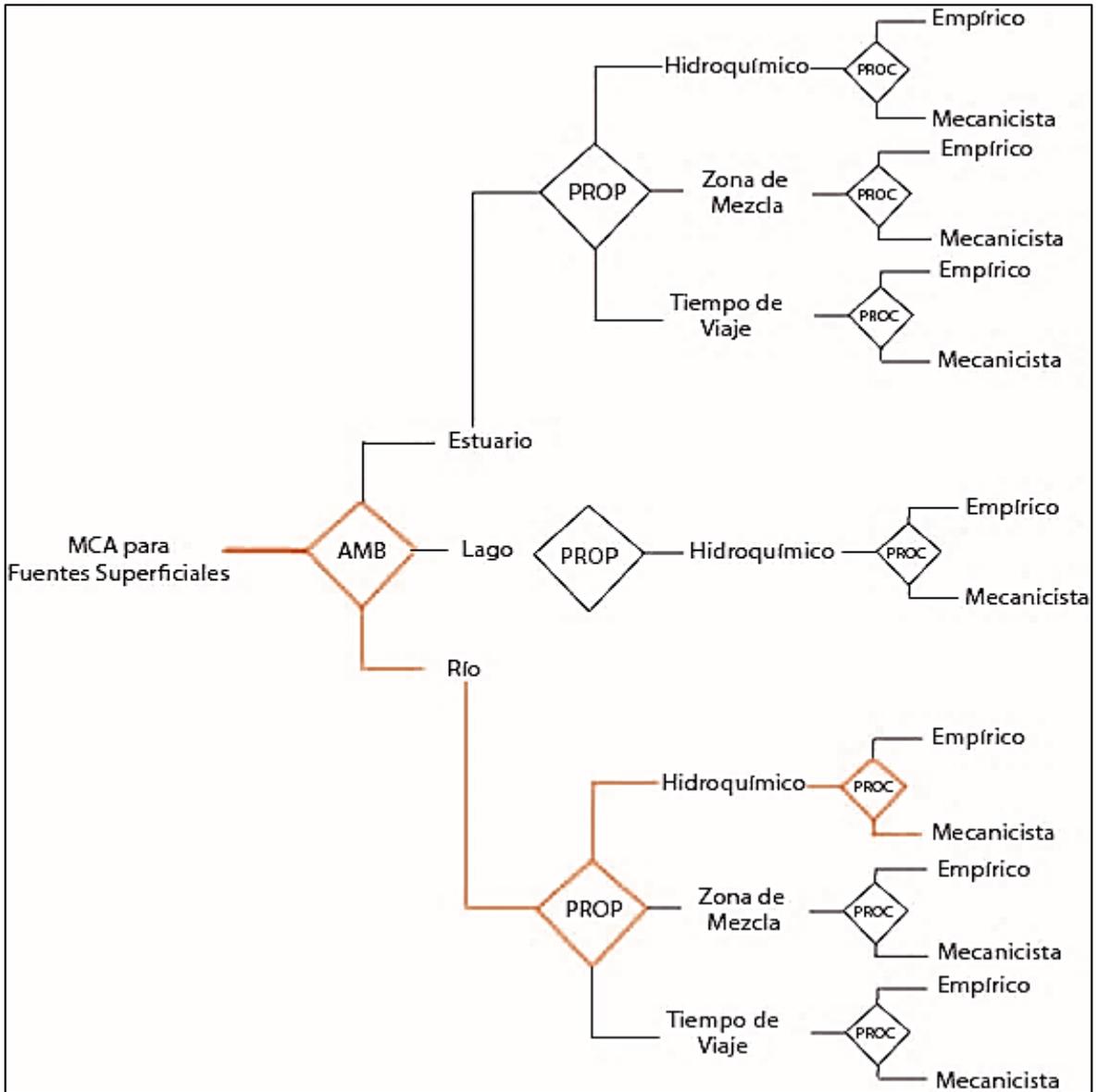
Para efectos del presente documento, se preseleccionaron los modelos de calidad para ríos, debido a que el sistema real que se piensa modelar es el río Bogotá.

¹¹⁴ LOZANO, G; PEÑA, L y ZAPATA, M. Modelación de Corrientes Hídricas Superficiales en el Departamento del Quindío, Colombia. En: Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. p. 47.

¹¹⁵ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 57.

¹¹⁶ COX A, B. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. En: The science of the Total Environment. Enero 2003. p. 338.

Figura 12. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua.



Fuente: COX A, B. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *En: The science of the Total Environment*. Enero 2003. p. 335-377. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 58.

3.2.2 Según sus propósitos, limitaciones y especificaciones. Es importante tener en cuenta las limitaciones que tiene cada modelo en particular, por ejemplo los modelos hidroquímicos fueron desarrollados específicamente para simular los procesos químicos y biológicos que ocurren directamente en el sistema hídrico a tratar, es decir, que modelan la química del agua del sistema en cuestión; los modelos de tiempo de viaje fueron desarrollados para describir el movimiento de los

solutos, y por último los modelos de zona de mezcla fueron desarrollados con el fin de cuantificar el tiempo que tardan en llegar aguas abajo los contaminantes en un accidente simple.

Teniendo esto cuenta a la hora de seleccionar un modelo, se hará más fácil la elección del modelo que se ajuste a las necesidades de simulación del sistema.

Se utilizarán modelos de carácter hidroquímico, ya que son estos los que están desarrollados para modelar la calidad del agua de un río que recibe descargas puntuales, el cual es el objeto del estudio de este documento.

3.2.3 Según su proceso de modelación. La manera en que un modelo describe el impacto sufrido por un cuerpo de agua al recibir tributarios o descargas contaminantes, a menudo se divide en dos amplias categorías, la mecanicista y la empírica; pero esta diferenciación no es del todo clara ya que algunas veces las mecanicistas contienen componentes derivados empíricamente¹¹⁷.

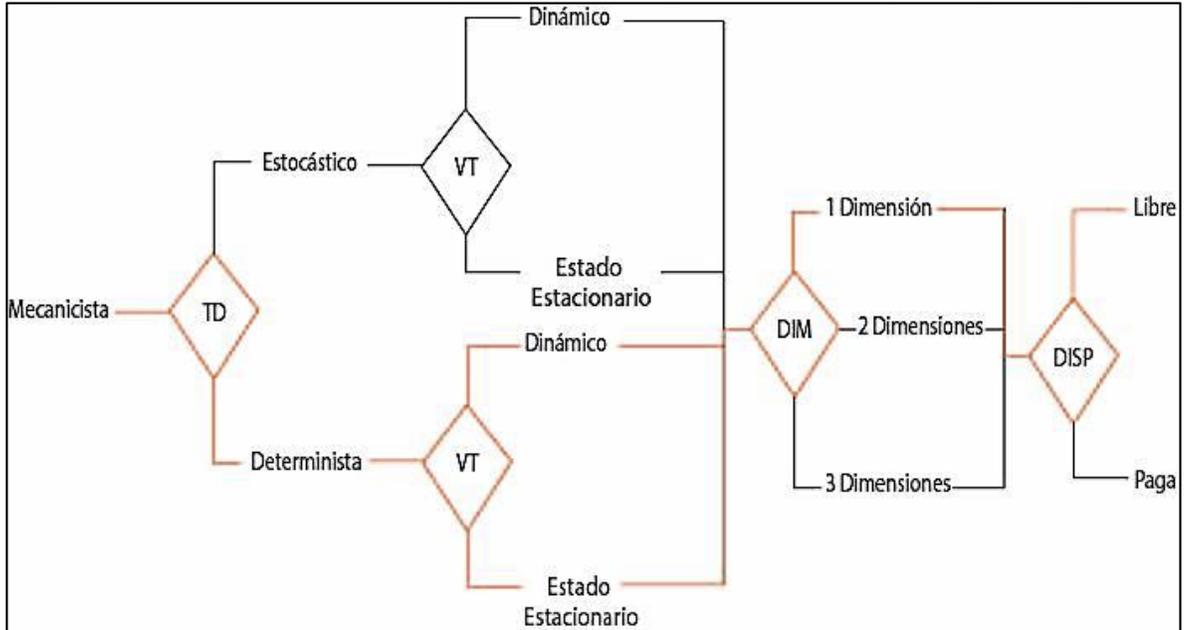
Por su naturaleza, los modelos de carácter mecanicista están en la capacidad de simular las variaciones de caudal y calidad del agua a lo largo del río en cuestión, reportando datos asociados al comportamiento real del sistema, por medio de balances de masa en cada uno de los tramos¹¹⁸; por otra parte, los modelos de calidad que son de carácter empírico, fueron creados para sistemas reales específicos; por lo tanto se prefieren los mecanicistas sobre los empíricos, ya que estos (los mecanicistas) se pueden ajustar para modelar variedad de sistemas.

Por medio de la investigación se pretende buscar mediante las predicciones del modelo, determinar la afectación del río Bogotá.

¹¹⁷ Ibid., p. 339.

¹¹⁸ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 59.

Figura 13. Modelos de calidad para fuentes superficiales de agua segunda parte.



Fuente: COX A, B. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *En: The science of the Total Environment*. Enero 2003. p. 335-377. Modificado por VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena and CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación de la calidad de agua del vertimiento en un proceso de curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 60.

3.2.4 Según su tipo de datos. Los modelos de calidad del agua se pueden dividir según su tipo de datos en estocásticos o deterministas.

En los modelos de carácter determinista, las entradas son fijas y existe una relación predeterminada entre las variables que son suministradas por el usuario y las variables de salida¹¹⁹, es decir, siempre se produce el mismo conjunto de resultados dado por el mismo conjunto de variables de entrada. Por otra parte, en los modelos de carácter estocástico, los valores de salida varían conforme se realizan unas y otras ejecuciones del modelo con los mismos parámetros de entrada.

Para el caso del presente documento, se seleccionarán modelos de calidad del agua deterministas, en donde las variables no tengan variaciones de carácter aleatorio, lo que traduce que ninguna de estas variables sea expresada como función de una distribución probabilística.

3.2.5 Según su variación con respecto al tiempo. Los modelos de calidad del agua se pueden dividir según su variación con respecto al tiempo en estacionarios o no estacionarios (mejor conocidos como dinámicos).

¹¹⁹ Ibid., p. 60.

Para los modelos de carácter estacionario, las variables de entrada del modelo de calidad del agua se distribuyen en el espacio, pero se mantienen constantes en el tiempo, y para la salida de cada parámetro, es como si se hubiera alcanzado el equilibrio. Por otra parte, para los modelos de carácter dinámico, se modela la variación del tiempo y de la distribución en el espacio, cosa que hace que tanto las variables y los parámetros de entrada como de salida, cambien con respecto al tiempo.

Para el caso del presente documento, se seleccionarán modelos de calidad del agua en estado estacionario y en estado dinámico, ya que ambos se encuentran contemplados dentro de las limitaciones de modelación del sistema.

3.2.6 Según sus dimensiones. Los modelos de calidad del agua se pueden dividir según su número de dimensiones en adimensionales, unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales.

3.2.6.1 Modelos adimensionales. Son modelos de calidad del agua cuya abreviación es 0D, que no están en la capacidad de simular en ninguna dirección los procesos de dispersión de contaminantes y el flujo en el cuerpo hídrico¹²⁰. Se encargan simplemente de representar los volúmenes y concentraciones de los contaminantes, basado en suposiciones iniciales del sistema.

3.2.6.2 Modelos unidimensionales. Son modelos de calidad del agua cuya abreviación es 1D, que están en la capacidad de simular en una sola dirección el flujo del agua y la dispersión de los contaminantes presentes en el cuerpo de hídrico en cuestión¹²¹. Por ejemplo, en un modelo de calidad del agua de un río, sería aguas abajo o en el sentido del escurrimiento, en estos se asume que la corriente se mezcla totalmente e instantáneamente en la profundidad y el ancho del flujo¹²².

3.2.6.3 Modelos bidimensionales. Son modelos de calidad del agua cuya abreviación es 2D, que están en la capacidad de simular en dos dimensiones (por medio del sistema cartesiano de coordenadas) el flujo del agua y la dispersión de los solutos en el recurso hídrico¹²³. Se utilizan ampliamente en ríos de gran anchura, puesto que en estos cuerpos de agua, se presentan variaciones significativas de las concentraciones de los contaminantes de una ribera a la otra¹²⁴.

¹²⁰ COX A, B. Op. Cit., p. 338.

¹²¹ Ibid., p. 338.

¹²² VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 61.

¹²³ COX A, B. Op. Cit., p. 339.

¹²⁴ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 61.

El flujo del agua y la dispersión de los contaminantes en el sistema, se representan en dirección transversal (a lo ancho del sistema) y en dirección del sentido del flujo del agua.

3.2.6.4 Modelos tridimensionales. Son modelos de calidad del agua cuya abreviación es 3D, que están en la capacidad de simular en tres dimensiones la dispersión de los contaminantes y el flujo de generalmente aguas subterráneas o de sistemas muy complejos de aguas superficiales como lo son los estuarios de gran extensión¹²⁵.

El flujo del agua y la dispersión de los contaminantes en el sistema, se representan en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, los cuales generalmente se utilizan para simular procesos de carácter químico y/o biológico; y como son modelos mucho más sofisticados, es decir, que requieren mayor información que los modelos anteriormente enunciados, su utilización es poco común¹²⁶.

3.2.7 Según su disponibilidad. Una de las características que mayor importancia tiene a la hora de clasificar un modelo de calidad del agua, es su disponibilidad.

Los modelos de calidad del agua se pueden dividir según su disponibilidad en modelos de carácter libre o modelos pagos.

Cuando se hace referencia a un modelo de calidad del agua de carácter libre, se habla de un modelo que tiene dominio público, es decir, que su licencia de uso, documentos de soporte y manuales de instalación y acceso; son gratuitos. Por otra parte, los modelos pagos de calidad del agua, son empleados por organizaciones que pagan un dinero por el uso del software de simulación bajo las condiciones de confidencialidad que exige el desarrollador, ya que estos no poseen manuales ni documentos de soporte para su manejo.

Para el caso del presente documento, se seleccionarán modelos de calidad del agua de carácter libre, ya que estos son los que generalmente se utilizan para evaluar la afectación de fuentes superficiales de agua por la descarga puntual de vertimientos de carácter contaminante.

3.3 SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

3.3.1 Matriz de selección. Para seleccionar el modelo que mejor se acople con las características que posee el sistema real a simular, se deben evaluar y comparar ciertos parámetros entre los modelos preseleccionados y darles una ponderación

¹²⁵ Ibid., p. 62.

¹²⁶ COX A, B. Op. Cit., p. 339.

según su importancia; para luego ser tabulados mediante la matriz de selección de Pugh¹²⁷, la cual es una herramienta¹²⁸ que se basa en una serie de comparaciones entre más de dos¹²⁹ candidatos alternativos, en función de una serie de criterios o requisitos¹³⁰ previamente establecidos, para determinar el mejor entre ellos. En el método de Pugh, se le da una calificación de carácter numérico, a cada uno de los atributos conceptuales que serán calificados (en este caso como “+1” (bueno), “S” o “0” (igual) o “-1” (malo)) y comparados entre las diferentes opciones¹³¹.

Las características que se tendrán en cuenta para llevar a cabo la ponderación, calificación y posterior selección del modelo de calidad de agua a utilizar (mediante la sumatoria de los productos entre la ponderación y la calificación), serán explicadas a continuación.

3.3.2 Criterios de selección. Es preciso recordar, que los criterios que se van a tener en cuenta para el proceso de selección del modelo que mejor se ajuste a las necesidades del sistema, deben estar basados en una revisión bibliográfica que permita vislumbrar cuales tienen mayor peso a la hora de evaluar el impacto causado por una descarga generada en un proceso de curtido de pieles, a una fuente superficial de agua como el río Bogotá.

3.3.2.1 Importancia. Es el criterio más significativo en la matriz, ya que éste es el que le da jerarquía a cada una de las variables. Éste valor mayor que cero, se multiplica por la calificación de una variable y la sumatoria de los productos entre la importancia y la calificación de cada una de las variables para un mismo modelo, será la salida de la matriz para ese modelo.

3.3.2.2 Costo. Si la descarga y/o puesta en marcha de un modelo tiene un costo monetario, se le dará una valoración nula y para los que no representen ningún gasto, se les dará una de “+1”.

3.3.2.3 Dimensiones. Como se explicó anteriormente, existen modelos de calidad del agua de carácter adimensional, unidimensional, bidimensional y

¹²⁷ PUGH, Stuart. Total design: Integrated methods for succesful product engineering. 1991. Addison-Wesley Publishing Company. p. 121.

¹²⁸ BAILEY D, Bill y LEE, Jan. Decide and conquer a Pugh matrix can help teams appraise situations, evaluate choises. En: Quality Progress. Abril 2016. p. 32.

¹²⁹ CERVONE H, Frank. Managing digital libraries: The view from 30000 feet applied digital library project management using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations. En: OCLC Systems & Services: International digital library perspectives. Junio 2009. p. 228.

¹³⁰ YASSERI, Sirous y BAHAI, Hamid. Decision-support tools for selection of pipeline corrosión coatings. En: The Journal of Pipeline Engineering. 2017. p. 101.

¹³¹ BAILEY D, Bill y LEE, Jan. Op. Cit., p. 32.

tridimensional. Según Chapra¹³², los ríos como el río Bogotá se deben analizar en una sola dimensión (en el sentido del flujo), ya que el largo de la fuente hídrica es una distancia que con respecto al ancho y profundo del río, es muy superior. Por lo tanto, se le da una valoración nula a los modelos que pueden simular en más de una dimensión, ya que entre más dimensiones se tengan en cuenta para el análisis, más compleja será su evaluación¹³³.

3.3.2.4 Manual del usuario y soporte. El hecho de que el modelo venga con su manual de soporte, guía del usuario y línea de apoyo directo con los desarrolladores, hace que tenga mayor valoración sobre un modelo que no lo posea; ya que esta característica es limitante a la hora de ejecutar este tipo de herramientas en cuanto a la actualización del modelo se refiere.

3.3.2.5 Parámetros modelados. Tener la capacidad de simular los parámetros previamente seleccionados, es de las características que mayor valoración tiene, ya que esta capacidad resulta diferenciadora a la hora de evaluar las variables de salida de cada modelo, y con esto, analizar la posible afectación del cuerpo de agua receptor, para este caso, el río Bogotá.

3.3.2.6 Precisión. El hecho de que los parámetros y variables de salida de los modelos sean confiables, hace que se le dé una valoración importante ya que, si estos no son precisos y confiables, no se podrá evaluar de manera categórica la afectación del río en cuestión, causada por el vertimiento proveniente del proceso de curtido.

3.3.2.7 Referentes bibliográficos. Que el modelo sea utilizado actualmente en países reconocidos a nivel mundial (como EE.UU.) por su compromiso con el desarrollo del conocimiento, hace que sea un modelo con respaldo bibliográfico, lo cual es crucial a la hora de seleccionar un modelo.

3.3.2.8 Uso del modelo. Un modelo tanto teórica como operativamente fácil de usar, tendrá mayor valoración sobre uno que no lo sea, ya que esta cualidad desemboca en una facilidad o dificultad a la hora de analizar sus resultados y variables de salida.

3.3.2.9 Variabilidad temporal. Este es el criterio de selección que menor peso tiene en la matriz de selección (valoración nula para los modelos dinámicos y "+1" para los estacionarios), ya que en países del continente americano como

¹³² CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 9.

¹³³ Ibid., p. 10.

Colombia y EE.UU., los permisos de vertimientos tienden a requerir modelos de carácter estacionario¹³⁴.

Para el caso del presente documento, se seleccionará un modelo de calidad del agua que esté de acuerdo con los requerimientos del sistema en cuestión. Entre los requerimientos que se destacan, se encuentran los pertenecientes a los establecidos por la legislación ambiental vigente en el territorio colombiano, los pertenecientes a la cuenca alta del río Bogotá, más exactamente en el tramo que está comprendido entre las estaciones de monitoreo Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar, y los pertenecientes a los vertimientos realizados directamente al río por la empresa ubicada en el municipio de Villapinzón.

En el Cuadro 2 se describirán los modelos de calidad del agua preseleccionados de la bibliografía, que son utilizados hoy en día a nivel nacional e internacional para simular la calidad del agua.

Cuadro 2. Descripción de las características de los modelos de calidad del agua preseleccionados.

| Modelo | Descripción |
|----------|--|
| EXAMS | Es un modelo desarrollado por la USEPA, de libre acceso a su manual de usuario, el cual formula modelos de ecosistemas acuáticos y evalúa rápidamente el destino, el transporte y las concentraciones de exposición de sustancias químicas orgánicas sintéticas, incluidos pesticidas, materiales industriales y lixiviados de los sitios de eliminación. Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>EXAMS Version Index</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/QGrtLU |
| EPD-RIV1 | Es un modelo hidrodinámico desarrollado por la USEPA junto con el cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU.; de carácter dinámico y unidimensional, el cual simula ríos y arroyos con condiciones de flujo muy inestables. Tiene en cuenta las corrientes, profundidades, velocidades, alturas de agua de superficie, temperatura del agua, especies de nitrógeno y fósforo, oxígeno disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅), entre otras. Fuente: Environmental Protection Division. <i>Water Quality Modeling</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/QGrtLU |
| PLOAD | Es un modelo desarrollado por la USEPA, el cual modela la carga de cualquier contaminante por año, mediante la simulación de procesos hidrológicos, con el fin de ubicar las áreas de mayor carga de contaminantes dentro de la subcuenca. Fuente: PLOAD Version 3.0. <i>User's Manual</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/7yJuD9 |

¹³⁴ COX A, B. Op. Cit., p. 337.

Cuadro 2. (Continuación)

| Modelo | Descripción |
|---------------|---|
| BIOPLUME | Es un modelo bidimensional desarrollado por la USEPA, de carácter libre, que simula la atenuación natural de contaminantes orgánicos (por ejemplo hidrocarburos) en aguas subterráneas debido a los procesos de advección, sorción, dispersión, y biodegradación tanto aeróbica como anaeróbica. Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>BIOPLUME III</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/MiWsnY |
| QUAL2KW | Es un modelo de carácter unidimensional desarrollado por la USEPA y mejorado por la Universidad de Washington, el cual estima la calidad del agua (estimando varios parámetros mediante una subrutina de optimización, basada en algoritmos genéticos) en ríos en estado estacionario. Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>QUAL2KW</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/DfCrww |
| MODFLOW | Es un modelo tridimensional de diferencias finitas, desarrollado por el Servicio Geológico de EE.UU. (USGS), de carácter libre que simula en flujo constante y estado no estacionario, la calidad del agua generalmente de fuentes subterráneas y muy pocas veces de aguas superficiales. Fuente: USGS Science for a Changing World. <i>USGS Groundwater Information</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/CZbpy4 |
| BLTM | Es un modelo de transporte lagrangiano ramificado de carácter libre, desarrollado por el USGS para sistemas de alta variabilidad, el cual simula la advección, dispersión y reacciones químicas entre los contaminantes que afectan la calidad del agua de ríos y estuarios en estado estacionario, por medio de canales unidimensionales con geometría conocida. Fuente: USGS Science for a Changing World. <i>Water Resources of the United States</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/qWhRde |
| QUAL2K | Es un modelo libre y unidimensional cuasi dinámico que trabaja en estado estacionario, el cual fue desarrollado por la USEPA, que permite simular el flujo y la calidad del agua en ríos y otras fuentes superficiales de agua de bajo caudal, simulando 17 parámetros fisicoquímicos, tramos longitudinalmente heterogéneos, procesos de autodepuración, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas que tienen lugar en el sistema. Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>Stream Water Quality Model</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/5oLhFJ |

Cuadro 2. (Continuación)

| Modelo | Descripción |
|---------------|---|
| WASP | <p>Es un modelo en una, dos y tres dimensiones, de carácter libre desarrollado por la USEPA para predecir la calidad del agua de un sistema dinámico a raíz del análisis de la respuesta ante un fenómeno natural o la contaminación generada por el hombre. Contiene datos para 15 propiedades fijas y 17 variables de -100 a 800°C y hasta 1000 bar.</p> <p>Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)</i>. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/bdLaja</p> |
| HSPF | <p>Es un modelo unidimensional de simulación hidrológica con FORTRAN, de carácter libre, desarrollado por la USEPA, funciona tanto en estado estacionario como en estado no estacionario para predecir la hidrología de las cuencas y la calidad del agua, afectados por contaminantes orgánicos convencionales y tóxicos para arroyos, ríos y embalses.</p> <p>Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF)</i>. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/7MnRvY</p> |
| QUAL2E | <p>Es un modelo desarrollado por la USEPA y mejorado por la Universidad de Tufts para ser de carácter unidimensional y que funcione generalmente en estado estacionario. Simula el impacto de las cargas contaminantes sobre cerca de 15 variables asociadas a la calidad del agua a lo largo de un río y sus afluentes.</p> <p>Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>QUAL2E Windows Interface User's Manual</i>. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/LNZHS4</p> |
| EFDC | <p>Es un modelo hidrodinámico desarrollado por la USEPA con ayuda del Instituto de Ciencias Marinas de Virginia, que simula constituyentes de la calidad del agua de las aguas superficiales como ríos, lagos, embalses, estuarios, etc., como el transporte de contaminantes, sedimentos, salinidad y procesos biogeoquímicos, ya sea en una, dos y tres dimensiones.</p> <p>Fuente: United States Environmental Protection Agency. <i>Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)</i>. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/oy936j</p> |
| MIKE11 | <p>Es un modelo hidrodinámico libre y unidimensional desarrollado por el Instituto de Hidráulica Danés (DHI), el cual permite la evaluación del impacto que genera un vertimiento a un sistema hídrico, mediante la simulación de algunos parámetros indicadores de calidad del agua y transporte de sedimentos en fuentes de agua superficiales.</p> <p>Fuente: MIKE 11 Powered by DHI. <i>MIKE 11</i>. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/szEP4b</p> |

Cuadro 2. (Continuación)

| Modelo | Descripción |
|---------------|--|
| QUASAR | Es un modelo de carácter unidimensional y dinámico desarrollado por la Agencia Ambiental del Reino Unido (UKEA), el cual evalúa mediante ecuaciones diferenciales el impacto ambiental, transporte y transformación de los solutos en un río. Fuente: Water Resource Associates. <i>QUASAR Lite</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/RFcM7d |
| TOMCAT | Es un modelo desarrollado por empresa británica <i>Thames Water</i> , que funciona en estado estacionario con el fin de ayudar en el proceso de revisión de los estándares de calidad del agua del río Támesis. Fue diseñado de tal manera, que las aplicaciones rápidas a cualquier captación fueran posibles, pudieran permitir la estimación de los efectos diurnos y del tiempo de viaje, y ser capaz de correlacionar cualquier descarga de efluente al río con el flujo en el agua receptora. Fuente: TOMCAT Consultants. <i>Water Quality In Distribution</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/WUoY1n |
| ISIS | Es un modelo unidimensional y dinámico para ríos y estuarios, desarrollado y comercializado por la consultora <i>Halcrow UK</i> , capaz de simular el flujo y la calidad del agua. También es capaz de modelar algunos procesos de sedimentación del agua. Fuente: ISIS Water Quality User Manual. <i>Water Quality Processes</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/oLkoU9 |
| SIMCAT | Es un modelo de estado estacionario, unidimensional y de carácter estocástico, desarrollado por la UKEA, que describe la calidad del agua de los ríos en una cuenca. Es utilizado para ayudar a planificar las medidas necesarias para mejorar la calidad del agua de los ríos mediante la predicción del comportamiento de la calidad del agua, con estadísticas resumidas como la media y el percentil 90 o 95. Representa los insumos de las descargas de efluentes de fuentes puntuales y el comportamiento de los solutos en el río. Fuente: European Scale Modelling. <i>Regulation for Water Quality</i> . [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: https://goo.gl/Z3UxCw |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Resultado de la matriz de selección. Se tuvieron en cuenta cada uno de estos criterios de selección previamente explicados, para elaborar la matriz de selección y con esta elegir el modelo que mejor se ajustara a las necesidades del sistema real. Para cumplir con este cometido, se le dieron valoraciones de “-1” a los criterios desfavorables con respecto a las demás alternativas, “0” a los que no son relevantes para su comparación y “+1” a los que prevalecían sobre los demás.

A cada uno de estos criterios se les dio una ponderación según su nivel de importancia, para que al final, para cada criterio la valoración se multiplique por la

ponderación, y realizar la sumatoria de cada modelo, se escoja al modelo que compute la mayor suma.

En la Tabla 6 se presenta un resumen con algunos resultados obtenidos de la matriz de selección que se encuentra en el Anexo C.

Tabla 6. Resumen de la matriz de selección del modelo de calidad del agua para la simulación del impacto generado en el río Bogotá.

| Criterios de selección | Importancia | Modelos de calidad del agua | | | | | | |
|------------------------------|-------------|-----------------------------|-----------|----------|------------|------------|-------------|----------|
| | | BIOPLU ME | EXA MS | HSP F | QUAL 2E | QUAL 2K | QUAL2 KW | WAS P |
| Costo | 4 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 |
| Parámetros modelados | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Manual del usuario y soporte | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Precisión | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Referentes bibliográficos | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Usos del modelo | 2 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | -1 |
| Dimensiones | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Variabilidad temporal | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Total | | 11 | 3 | 14 | 11 | 17 | 5 | 12 |

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la matriz de selección fue que el modelo QUAL2K es el que se ajusta a los requerimientos del sistema real en cuestión. Entre las características generales de este programa están que es un modelo unidimensional, en estado estacionario, los procesos de modelación son mecanicistas aunque contiene componentes empíricos, los tipos de datos del modelo son deterministas, su manual de usuario además de la descripción de su uso se encuentran ampliamente documentados y es un modelo de descarga gratuita en internet¹³⁵.

¹³⁵ VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Op. Cit., p. 67.

3.4 QUAL2K

Debido a que por medio de la matriz previamente explicada, se seleccionó al modelo QUAL2K para llevar a cabo a modelación de la calidad del agua del río Bogotá, nace la necesidad de ahondar más en su funcionamiento y origen, esto con el fin de facilitar su uso en el mundo de la ingeniería, más específicamente en el campo de la protección y cuidado de las fuentes superficiales de agua que se ven directamente amenazadas por la industria.

En el año 1985, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), desarrolló un modelo matemático llamado QUAL2E, el cual desde entonces ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial para evaluar el impacto que generan algunos contaminantes denominados convencionales, presentes en una fuente hídrica. Con el pasar de los años y de las investigaciones, el modelo se actualiza a QUAL2K¹³⁶ y QUAL2Kw¹³⁷ en los años 2000 y 2008 respectivamente; logrando incluir parámetros adicionales que no se tuvieron en cuenta en el año 1985.

3.4.1 Generalidades. El modelo de calidad QUAL2K es de carácter libre, es decir, se puede encontrar de manera gratuita en internet.

Determina la calidad hídrica de fuentes superficiales de agua, como los ríos; permitiendo así, simular sistemas en los cuales se encuentren involucrados procesos de carácter dendrítico, incluyendo también la corriente principal y las de los tributarios. Es de carácter unidimensional ya que está codificado para que funcione tal y como se explicó anteriormente en la sección 3.3.2.3. El flujo del agua y las cargas contaminantes de la corriente principal y de los tributarios, se conciben en condiciones de flujo estable¹³⁸, ya sean por separado o integradas. Comparándolo con su antecesor de 1985, éste no se encuentra limitado en la cantidad y longitud de tramos que puede modelar.

A continuación, el Cuadro 3 presentará los parámetros que modela el simulador seleccionado por la matriz.

¹³⁶ PARK, Seok Soon y LEE, Yong Seok. A water quality Modeling Study of the Nakdong River, Korea. En: Ecological Modeling. Noviembre 2001. p. 65.

¹³⁷ Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. Op. Cit., p. 8.

¹³⁸ CASTRO HUERTAS, Mayra Andrea. Aplicación del QUAL2KW en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2015. p. 20.

Cuadro 3. Parámetros modelados por QUAL2K y sus unidades respectivas.

| Parámetro | Unidades |
|---|-------------------------|
| Caudal | m ³ /s |
| Temperatura | °C |
| Conductividad | μmhoms |
| Sólidos Suspendidos Inorgánicos | mg D/L |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L |
| CBOD de reacción lenta | mg O ₂ /L |
| CBOD de reacción rápida | mg O ₂ /L |
| Nitrógeno Orgánico | μg N/L |
| Nitrógeno Amoniacal | μg N/L |
| Nitrógeno de Nitratos | μg N/L |
| Fósforo Orgánico | μg P/L |
| Fósforo Inorgánico | μg P/L |
| Fitoplancton | μg A/L |
| Nitrógeno Interno | μg N/L |
| Fósforo Interno | μg P/L |
| Detritos (Materia Orgánica Particulada) | mg D/L |
| Patógenos | UFC/100mL |
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L |
| Constituyente i | - |
| Constituyente ii | - |
| Constituyente iii | - |
| pH | Unidades de pH |

Fuente: PELLETIER, Gregory P.; CHAPRA, Seteve C. and TAO, Hua. QUAL2Kw; - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. En: Environmental Modelling & Software. Septiembre 2005. No. 21, p. 420.

Estas son las 22 variables que se presentan en la interfaz gráfica de Microsoft Excel con la que cuenta el usuario para diligenciar el programa, pero para el caso del presente documento, y debido a la disponibilidad de los datos, solamente se emplearán 15 de estas variables.

3.4.2 Descripción del modelo matemático. La modelación matemática de carácter predictivo de estos modelos, es una herramienta que permite una planificación basada en cálculos matemáticos y estadísticos inherentes al recurso hídrico y a su vez permite extrapolar los resultados a un sistema real, el cual se verá afectado por dicha elección.

A continuación, se describen los balances que se encuentran intrínsecos al modelo en cuestión, y que a su vez son utilizados en diferentes modelos mecanicistas describiendo principalmente el comportamiento de los contaminantes en fuentes superficiales como río y arroyos.

3.4.2.1 Balance de flujo. Tal como se explicó anteriormente en el numeral 1.1.2, el sistema de estudio se considera como un canal abierto y natural, ya que se encuentra en contacto permanente con la atmósfera y puede contener profundidades cambiantes o constantes a lo largo del tramo del cauce en cuestión.

En cualquier sección del canal, se puede determinar el caudal representado por la letra Q. Éste está definido en la Ecuación 1 como el producto entre la velocidad media del fluido y el área de sección transversal por la que dicho fluido atraviesa de manera perpendicular¹³⁹.

Ecuación 1. Caudal.

$$Q = VA$$

Fuente: MOTT, Robert. Mecánica De Fluidos Aplicada. Cuarta ed. México: Pearson Education, 1996. p. 325.

El modelo QUAL2K, es un modelo que acopla balances, correlaciones y modelos matemáticos, para lograr la descripción de ciertos fenómenos que puedan tener lugar en una misma fuente superficial de agua. Es importante aclarar, que para el caso de la Ecuación 2 la cual es el resultado del análisis de la Figura 14, en el presente documento, se asume que los datos tanto de las entradas como de las salidas del modelo, se encuentran en estado estacionario; y que un balance de flujo es una derivación del análisis de un balance de masa que se explicará más adelante en este mismo capítulo.

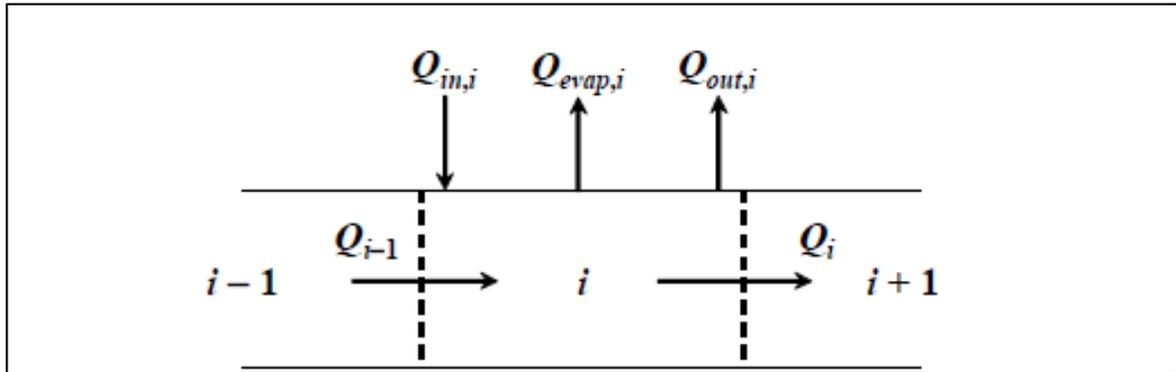
Ecuación 2. Balance de flujo.

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_{evap,i}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 11.

¹³⁹ Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. Op. Cit., p. 10.

Figura 14. Elementos del balance de flujo.



Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 11.

Resaltando el volumen de control establecido entre líneas punteadas y denominado con la letra i , en donde entra un caudal de subíndice “ $i-1$ ” que proviene del volumen de control inmediatamente anterior al seleccionado, también entra un caudal de subíndice “ in,i ” el cual es la representación de un tributario o de un vertimiento generado por un tercero al río. Del volumen de control seleccionado sale un caudal con subíndice “ $i+1$ ” para el volumen de control inmediatamente posterior, y salen dos caudales de subíndice “ $evap,i$ ” y “ out,i ”, los cuales corresponden a flujos de agua asociados a evaporación y a salidas o desviaciones del flujo del río, respectivamente; estos dos últimos caudales no son de uso obligatorio para poder llevar a cabo la modelación, puesto que a no ser de que se tenga la información completa y precisa, no se deben tener en cuenta, ya que su aporte es mínimo, sin embargo, el modelo cuenta con una pestaña en la cual se pueden diligenciar las celdas correspondientes a estos datos.

3.4.2.2 Características hidráulicas del sistema. Siguiendo con el orden de funcionamiento del modelo, éste lleva a cabo el cálculo de la profundidad y velocidad media de flujo por medio de la implementación de uno de estos tres métodos posibles: vertederos, curvas de calibración y la ecuación de Manning¹⁴⁰.

Debido a que QUAL2K tiene en cuenta el estado estacionario, es importante resaltar que las ecuaciones que se utilizan para determinar algunas variables, son de carácter semiempírico.

¹⁴⁰ Ibid., p. 12.

Para aplicar el método de vertederos, se debe tener en cuenta que éste solamente es utilizado en cuencas donde hay saltos de agua o cascadas, y la consecución de la información específica del sistema representa una gran complejidad¹⁴¹.

Para aplicar el método de curvas de calibración, se debe conocer a profundidad del sistema a tratar, lo que se traduce en un incremento en los costos de planeación¹⁴².

Para el presente documento se seleccionó el método de la ecuación semiempírica de Manning que se muestra en la Ecuación 3. Esto debido a su facilidad de implementación, ya que las variables, datos y parámetros que ésta necesita para ejecutarse, se puede conseguir por medio de una revisión bibliográfica o de medición directa en la fuente. A su vez fue elegida debido a que se conoce la geometría de la cuenca y coincide con la forma trapezoidal que asume el modelo.

Ecuación 3. Ecuación de Manning.

$$V = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 14.

Donde:

- El factor V corresponde a la velocidad media del fluido.
- El factor R corresponde al radio hidráulico de la cuenca.
- El factor S_0 corresponde a la pendiente con que discurre el agua.
- El factor n corresponde al coeficiente de rugosidad o factor de fricción de Manning.

Al ser una ecuación semiempírica para el Sistema Internacional, ésta necesita de una corrección numérica agregándole la constante 1,49 para que la Ecuación 4 sea equivalente a las unidades del Sistema Inglés¹⁴³.

¹⁴¹ Ibid., p. 13.

¹⁴² Ibid., p. 14.

¹⁴³ VATANKHAH, Ali R. and EASA, Said M. Simplified Accurate Solution for Design of Erodible Trapezoidal Channels. En: Journal Of Hydrologic Engineering. Noviembre 2011, p. 961.

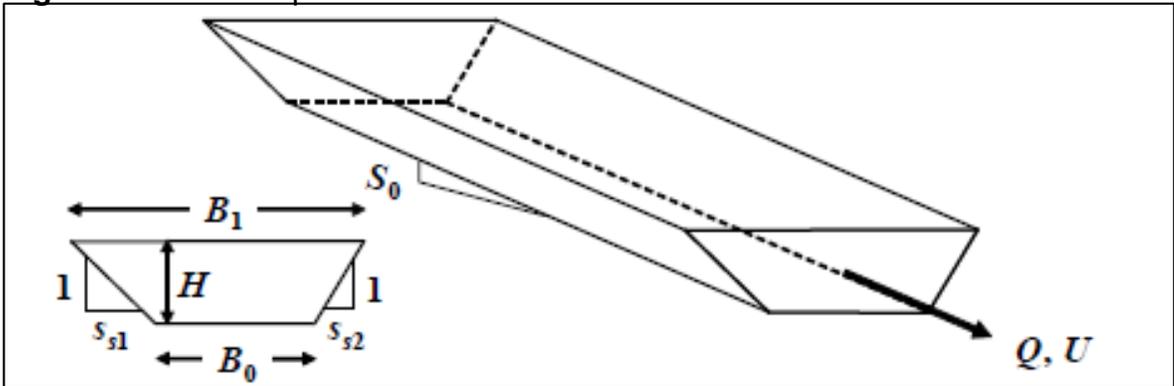
Ecuación 4. Ecuación de Manning para el Sistema Inglés.

$$V = \frac{1,49 R^{2/3} S_0^{1/2}}{n}$$

Fuente: VATANKHAH, Ali R. and EASA, Said M. Simplified Accurate Solution for Design of Erodible Trapezoidal Channels. En: Journal Of Hydrologic Engineering. Noviembre 2011, p. 961.

Como se mencionó anteriormente, el modelo asume los tramos de la cuenca como el canal de forma trapezoidal representado en la Figura 15, asumiendo siempre un estado estacionario.

Figura 15. Canal trapezoidal.



Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 15.

El radio hidráulico de un canal abierto permite analizar el comportamiento del flujo del fluido que lo atraviesa, ya que depende tanto del tamaño como de la forma del canal. La Ecuación 5 representa la relación general que existe entre el área mojada y el perímetro mojado de una misma figura.

Ecuación 5. Radio hidráulico.

$$R = \frac{A}{P}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 15.

Donde:

- El factor R corresponde al radio hidráulico.
- El factor A corresponde al área mojada del canal.
- El factor P corresponde al perímetro mojado del canal.

La determinación del área que hace el modelo QUAL2K en la Ecuación 6, se lleva a cabo por medio de una aproximación de la forma del cauce del río a una sección trapezoidal como se había mencionado anteriormente¹⁴⁴.

Ecuación 6. Área mojada de un canal trapezoidal.

$$A = \left[B_0 + \frac{(S_{s1} + S_{s2})H}{2} \right] H$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 15.

Donde:

- El factor A corresponde al área mojada del canal.
- El factor B_0 corresponde a ancho del fondo del canal.
- El factor B_1 corresponde a ancho superficial del canal que será utilizado más adelante.
- Los factores S_{s1} y S_{s2} corresponden a las pendientes laterales del canal.
- El factor H corresponde a la profundidad del canal.

Mientras que el perímetro mojado para un canal abierto de forma trapezoidal se presenta en la Ecuación 7¹⁴⁵.

Ecuación 7. Perímetro mojado de un canal trapezoidal.

$$P = B_0 + H \left(\sqrt{S_{s1}^2 + 1} + \sqrt{S_{s2}^2 + 1} \right)$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 15.

¹⁴⁴ Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. Op. Cit., p. 15.

¹⁴⁵ Ibid., p. 15.

Para obtener la Ecuación 8 que es la que usa el modelo para relacionar el flujo y la profundidad del tramo del río, primero se despeja la velocidad de la Ecuación 1 para así poder sustituirla en la Ecuación 3 y después de esto se reemplaza el término del radio hidráulico de la Ecuación 5 en la Ecuación 3¹⁴⁶.

Ecuación 8. Ecuación de Manning utilizada por QUAL2K.

$$Q = \frac{S_0^{1/2} A^{5/3}}{P^{2/3} n}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 15.

Para resolver la profundidad H de cada tramo seleccionado en el cuerpo de agua en cuestión y obtener la Ecuación 9, se deben reemplazar las Ecuaciones 6 y 7, en la Ecuación 8 y despejar el término H, el cual va desde 1 hasta n, donde n es el número de iteraciones requeridas para que se sobrepase el valor ε de tolerancia expresado en la Ecuación 10, el cual está especificado por el modelo (1E-3%)¹⁴⁷.

Ecuación 9. Cálculo iterativo de la profundidad para QUAL2K.

$$H_k = \frac{(Q n)^{3/5} \left[B_0 + H_{k-1} \left(\sqrt{S_{s1}^2 + 1} + \sqrt{S_{s2}^2 + 1} \right) \right]^{2/5}}{S_0^{3/10} \left[B_0 + \frac{(S_{s1} + S_{s2})H}{2} \right] H_{k-1}}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 16.

Ecuación 10. Error estimado para QUAL2K.

$$\varepsilon = \left| \frac{H_{k+1} - H_k}{H_{k+1}} \right| \times 100$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 16.

¹⁴⁶ Ibid., p. 15.

¹⁴⁷ Ibid., p. 16.

El modelo utiliza la Ecuación 11 para calcular el ancho promedio de la cuenca, en unidades métricas¹⁴⁸.

Ecuación 11. Ancho promedio del tramo.

$$B = \frac{A}{H}$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 16.

Para terminar con la caracterización hidráulica del sistema por parte de QUAL2K, la Ecuación 12 representa el cálculo del ancho superficial del cauce, en unidades métricas¹⁴⁹.

Ecuación 12. Cálculo del ancho superficial del cauce.

$$B_1 = B_0 + [(S_{s1} + S_{s2})H]$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 16.

Como se enunció en la sección 1.1.1, los ríos son una corriente natural que fluye con continuidad, cuyo discurrir hacia las partes bajas se da por el efecto de la gravedad, otorgándole al fluido una velocidad intrínseca que se puede medir directamente en el sistema con dispositivos de alta precisión¹⁵⁰. Por otra parte, si se tienen en cuenta los factores que afectan el flujo de los ríos, como lo son la aproximación del cauce a una geometría determinada, es posible fijar la profundidad y la velocidad media, como parámetros hidráulicos del sistema real utilizados por el modelo.

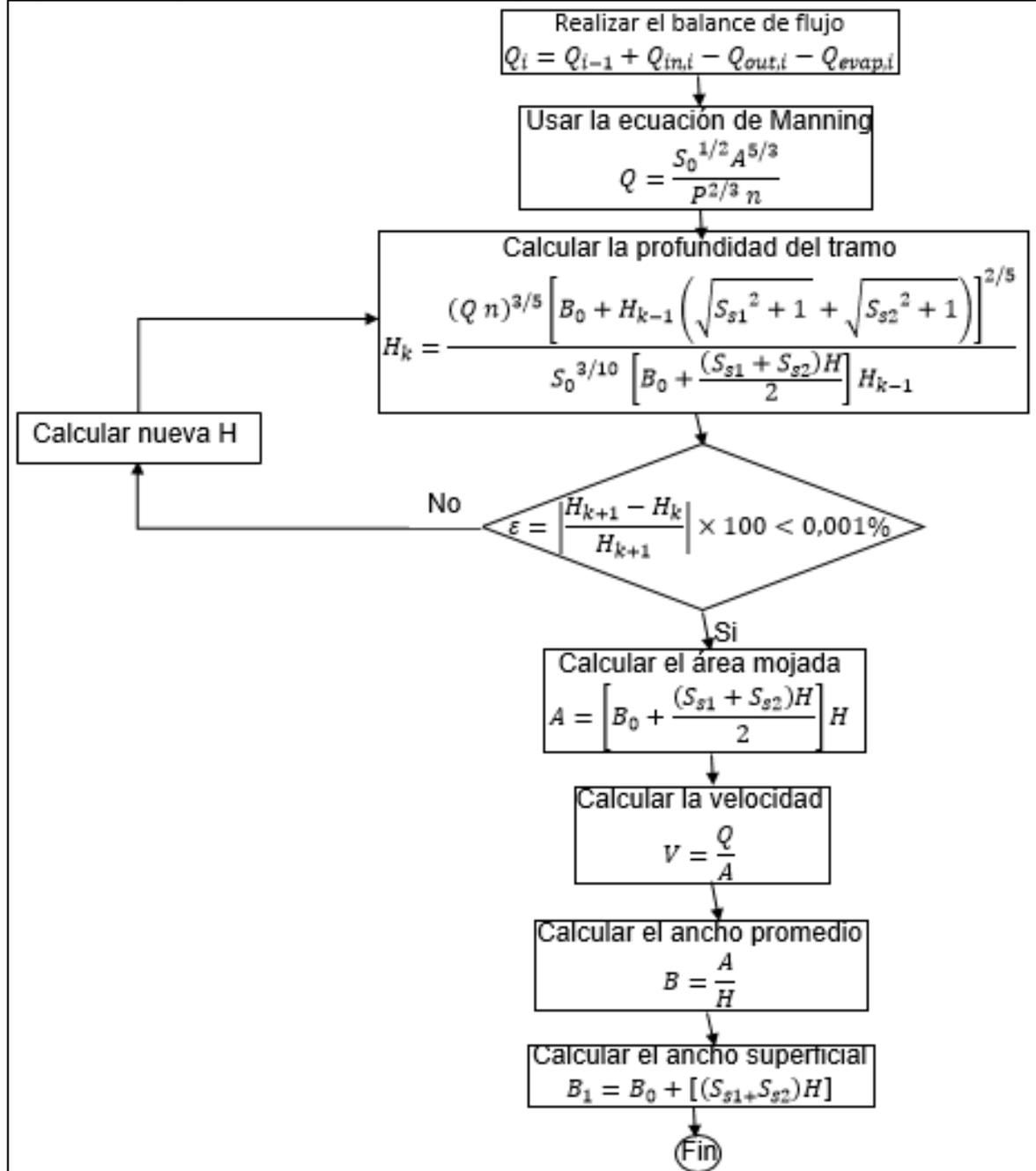
En la Figura 16 se resumen las operaciones lógicas que utiliza QUAL2K para llevar a cabo los cálculos relacionados con las características hidráulicas y los balances de flujo del sistema en cuestión.

¹⁴⁸ Ibid., p. 16.

¹⁴⁹ Ibid., p. 16.

¹⁵⁰ CÁRDENAS, Gustavo y CÁRDENAS, Jeannette. Op. Cit., p. 13.

Figura 16. Algoritmo de balance de flujo y caracterización hidráulica para QUAL2K.



Fuente: VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación De La Calidad De Agua Del Vertimiento En Un Proceso De Curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 76.

3.4.2.3 Balance de masa. En un sistema como el río Bogotá es importante tener en cuenta los fenómenos de transporte que ocurren en él, ya que el cuerpo de agua presenta cambios provocados por las descargas tanto difusas como puntuales

que recibe y por las extracciones que son producto de la actividad humana en su periferia.

La Ecuación 13 representa el balance de masa general simplificado en estado estacionario representado en la Figura 17, para expresar el transporte en dirección longitudinal de solutos realizado por QUAL2K para cada parámetro fisicoquímico que se desee modelar¹⁵¹.

Ecuación 13. Balance general de masa para cualquier parámetro fisicoquímico.

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} C_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 29.

Donde:

- El factor $\frac{dC_i}{dt}$ corresponde a la concentración del soluto a lo largo del tiempo.
- El factor $\frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1}$ corresponde a la concentración del elemento i-1.
- El factor $\frac{Q_i}{V_i} C_i$ corresponde a la concentración del elemento i.
- El factor $\frac{Q_{out,i}}{V_i} C_i$ corresponde a la concentración del elemento i+1.
- El factor $\frac{E_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i)$ corresponde a la transferencia de masa por dispersión entre los elementos i-1 e i.
- El factor $\frac{E_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i)$ corresponde a la transferencia de masa por dispersión entre los elementos i+1 e i.
- El factor $\frac{W_i}{V_i}$ corresponde a la transferencia de masa por descargas puntuales y difusas.
- El factor S_i corresponde a las entradas y salidas de constituyentes debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa.

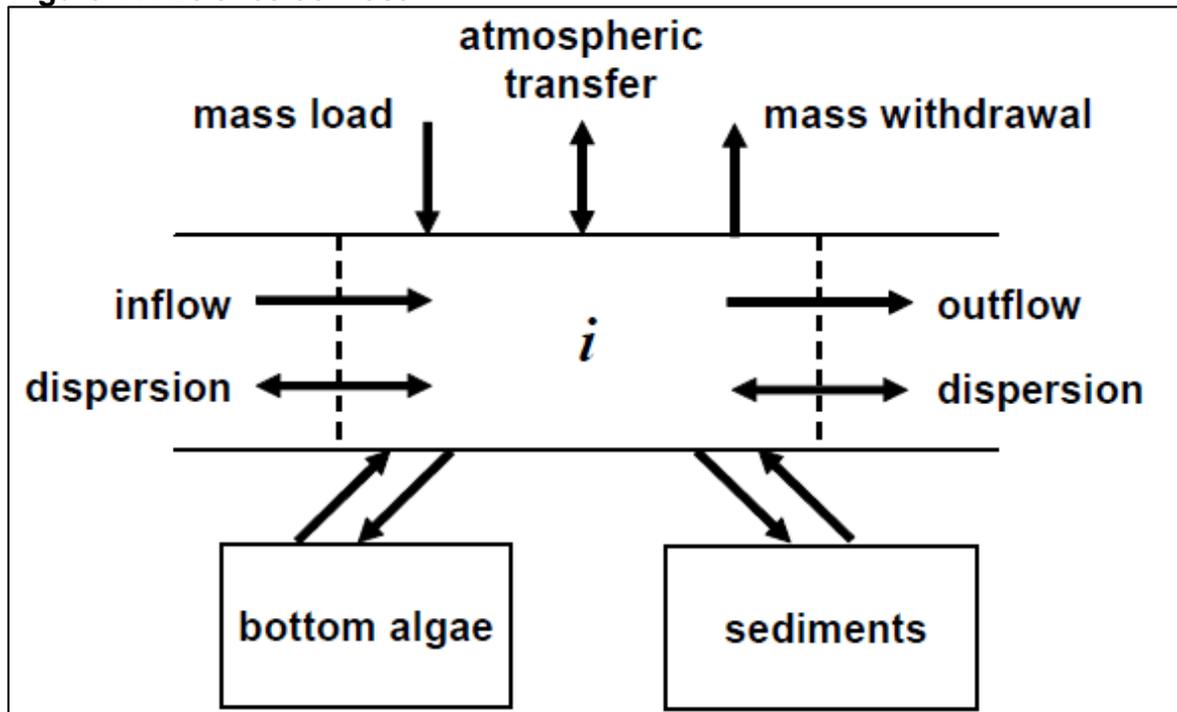
Este transporte en dirección longitudinal se ve regido por procesos de difusión turbulenta y advección¹⁵², los cuales le otorgan un carácter predictivo al modelo matemático, haciéndolo útil para determinar la afectación del río Bogotá causada por el vertimiento generado en una curtiembre del municipio de Villapinzón.

¹⁵¹ Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. Op. Cit., p. 29.

¹⁵² COX A, B. Op. Cit., p. 342.

Según Cox¹⁵³, la advección es un proceso mediante el cual, un soluto se desplaza debido a la existencia de un gradiente de concentraciones; mientras que la difusión está definida como la propagación física¹⁵⁴ de una especie a lo largo y ancho del sistema que la contiene.

Figura 17. Balance de masa.



Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 30.

Esta discretización del balance de masa para cada componente del sistema tiene una gran cantidad de consideraciones debido a que para cada una de las variables que constituyen dicho balance, existen diferentes métodos para realizarlo, ya que algunos son interdependientes o dependen de factores externos que deben ser diligenciados por el usuario en las hojas de cálculo de color turquesa, designadas para tal fin; los cuales están descritos de manera detallada en el capítulo 5 del manual del usuario¹⁵⁵, resaltando las interacciones y reacciones bioquímicas, de fotosíntesis, de respiración, de generación y consumo de oxígeno, relacionadas con el fitoplancton y los detritos, hidrólisis, dispersión, dilución, reacciones químicas,

¹⁵³ Ibid., p. 342.

¹⁵⁴ Diccionario de la Real Academia Española. *Definición de difundir*. [Consultado el 18 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/V22gmM>

¹⁵⁵ Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. Op. Cit., p. 31.

hidrobiológicas y de elementos carbonados, nitrogenados y fosforados, asociados a los fenómenos de transferencia de masa.

Esto sirve para explicar la relación íntima que tiene el río con la fauna y flora que lo tiene por hábitat y el aire y suelo que ocupa; ya que en teoría estos deberían ser los únicos protagonistas en este tipo de reacciones que intervienen directamente en la calidad de las aguas que discurren por el cauce de este efluente natural, aportando materia orgánica y otros compuestos en cantidades y concentraciones que el río tiene la capacidad de depurar por su naturaleza lótica.

3.4.2.4 Balance de energía. La transferencia de calor al igual que la de masa, se da por una fuerza impulsora que generalmente es un gradiente de algún componente entre dos puntos; para el caso de la transferencia de calor, es un gradiente de temperaturas¹⁵⁶.

Los procesos productivos de carácter industrial, generalmente requieren aumentar la temperatura del agua que se utiliza para llevar a cabo algún procedimiento específico u operación unitaria; generando así, un vertimiento con propiedades características dentro de las cuales se destaca la alta temperatura. La descarga de estos vertimientos sin ningún tratamiento previo de enfriamiento, perturba el sistema al que llega, generando desequilibrios térmicos y otras complicaciones asociadas a los demás agentes contaminantes que éste contiene.

Es por esto que se hace necesario tener en cuenta dicha transferencia en el sistema a tratar por el modelo QUAL2K, a pesar de que se sepa que en el proceso de curtido de pieles, esta afectación es casi nula.

La Ecuación 14 resulta tras el análisis de la Figura 18, y representa el balance de energía expresado únicamente en función de la transferencia de calor, ya que las demás fuentes de energía, se consideran despreciables para el sistema en cuestión¹⁵⁷.

¹⁵⁶ Ibid., p. 18.

¹⁵⁷ Ibid., p. 18.

Ecuación 14. Balance de energía para cualquier tramo.

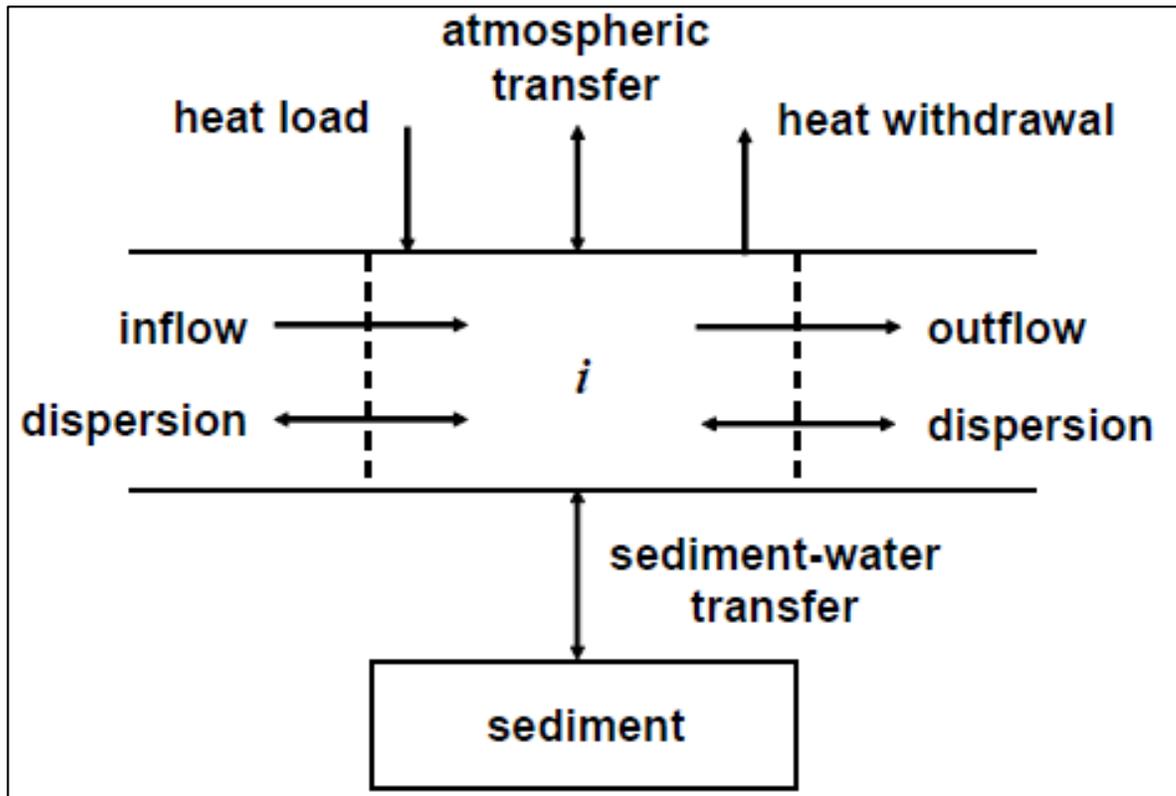
$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right)$$

Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 18.

Donde:

- El factor $\frac{dT_i}{dt}$ corresponde a la variación de la temperatura en función del tiempo.
- El factor $\frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1}$ corresponde a la transferencia de calor del elemento i-1.
- El factor $\frac{Q_i}{V_i} T_i$ corresponde a la transferencia de calor del elemento i.
- El factor $\frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i$ corresponde a la transferencia de calor con los alrededores.
- El factor $\frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i)$ corresponde a la transferencia de calor por dispersión entre i-1 e i.
- El factor $\frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i)$ corresponde a la transferencia de calor por dispersión entre i+1 e i.
- El factor $\frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right)$ corresponde a la transferencia de calor por descargas puntuales y difusas.
- El factor $\frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right)$ corresponde a la transferencia de calor entre el aire y el agua.
- El factor $\frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 \text{ cm}} \right)$ corresponde a la transferencia de calor entre el sedimento y el agua.

Figura 18. Balance de energía expresado en función del calor.



Fuente: CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 19.

Teniendo en cuenta que la discretización del balance de energía está solamente en función de la transferencia de calor, se tienen en cuenta los tres mecanismos de transferencia de calor que existen: radiación, conducción y convección, los cuales se deben describir de manera detallada en las hojas de cálculo que la interfaz ofrece para que el usuario opcionalmente las diligencie con el fin de hacer más que la modelación se aproxime a las condiciones reales del sistema que lo compone.

Al igual que para el balance de masa, se tienen en cuenta los aportes hechos por los alrededores del sistema, como lo son el suelo y el aire que rodea al río en el tramo de estudio.

Para el caso de las contribuciones por parte de la radiación solar, el modelo utiliza unas variables predeterminadas que están enlazadas a una base de datos (ubicada en el Apéndice B del manual del usuario¹⁵⁸) llamada NOAA por sus siglas en inglés, la cual toma como condiciones de entrada la zona horaria, coordenadas de latitud y

¹⁵⁸ Ibid., p. 84.

longitud, hora del amanecer, medio día y atardecer solar, e incluso la hora en la que se lleva a cabo la simulación, incluyendo también las correcciones por la refracción atmosférica que tienen lugar en la zona previamente descrita, los cuales se establecen como campos imperativos para correr la simulación, por parte del usuario.

En el caso de la transferencia de calor por conducción y convección, están descritas por las interacciones que han sido descritas por expertos a lo largo de los años, en las diferentes actualizaciones del programa, destacando los aportes hechos por Adams et al.¹⁵⁹ en el año de 1987.

Los procesos asociados a la evaporación y condensación fueron descritos por la ley de Dalton¹⁶⁰.

Por último están las hojas de cálculo en el software que incluyen los campos en los que de manera opcional se estudia de la temperatura del aire, punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad entre otras.

El funcionamiento de QUAL2K para la modelación de la calidad del agua del río Bogotá, sigue un orden lógico. La primera etapa consiste en diligenciar la información del río suministrada por el usuario en la interfaz gráfica de Microsoft Excel, así como la ruta del cauce y las especificaciones de los métodos de solución tanto de pH como de integración. Seguido a esto, se deben ingresar los datos correspondientes a las características hidráulicas del sistema, para así correr los cálculos numéricos programados previamente en Fortran 90. Para que al finalizar esto, se obtenga el comportamiento mediante un gráfico, de las diferentes variables que se tuvieron en cuenta a lo largo del tramo de estudio. Los resultados y el análisis de estos, serán el contenido del siguiente capítulo del presente documento.

¹⁵⁹ Ibid., p. 25.

¹⁶⁰ Ibid., p. 27.

4. RESULTADOS

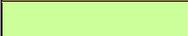
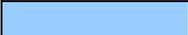
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DEL MODELO

La conexión entre el modelo QUAL2K y el usuario, se encuentra asistida por la interfaz de Microsoft Excel¹⁶¹. Ésta representación gráfica se encarga de facilitar la interacción entre la matriz programadora de Fortran 90 y el usuario que la manipula¹⁶², con el fin de interpretar el comportamiento de una fuente superficial de agua ante un agente externo.

Para cumplir con la interpretación correcta del programa y poder realizar un análisis adecuado de la información que se le debe suministrar y que de la que se va a recibir, es necesario conocer a profundidad su interfaz, implicando a cada una de las hojas de cálculo que la componen.

Como se explica en el Cuadro 4, las hojas de cálculo que componen la interfaz del modelo representadas a través de Microsoft Excel, están divididas en diferentes colores que indican sus funciones y a su vez indican cuales son las que se deben modificar de manera obligatoria, las que se deben modificar de manera opcional, las que no se deben modificar, las que muestran los resultados numéricos, las que muestran los resultados gráficos, entre otras.

Cuadro 4. Relación cromática de las hojas de cálculo del modelo.

| COLOR | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
|  | Información general del modelo |
|  | Zona horaria |
|  | Información opcional de los tributarios que afectan al modelo |
|  | Salidas numéricas del modelo |
|  | Salidas gráficas del modelo |
|  | Salidas gráficas del modelo |

Fuente: VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación De La Calidad De Agua Del Vertimiento En Un Proceso De Curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 81.

¹⁶¹ Ibid., p. 3.

¹⁶² Ibid., p. 5.

4.2 MODELACIÓN DEL IMPACTO A LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO BOGOTÁ CAUSADO POR EL VERTIMIENTO GENERADO EN UNA CURTIEMBRE

Para el caso del presente documento, se tuvieron en cuenta las mediciones hechas en las estaciones de monitoreo de la calidad del agua del río Bogotá, aguas arriba y aguas abajo de la descarga puntual de la empresa curtiembre; hechas en los meses de septiembre del año 2016 y enero de 2017, meses en los cuales el país se encontraba en temporada de lluvia (8 a 12 días por mes)¹⁶³ y de sequía (4 a 8 días por mes)¹⁶⁴ respectivamente.

Debido a que Colombia se encuentra en la zona de convergencia intertropical, presenta dos temporadas de lluvias y de sequía por año, temporadas que coinciden con los meses en los que se tomaron las muestras de calidad del agua del río en las estaciones Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar. Esto concuerda con los requerimientos prescritos del modelo seleccionado, ya que éste exige que las mediciones sean hechas en condiciones extremas en cuanto a la climatología se refiere, permitiendo así realizar predicciones del comportamiento del río con el fin de cumplir con los objetivos de recuperación expuestos en el numeral 1.3.3, basadas en los resultados de la modelación.

Para iniciar la modelación, se deben diligenciar de manera obligatoria unas hojas de la interfaz de Microsoft Excel en las cuales se ingresan los datos de la entrada del río tanto aguas arriba como aguas abajo, los datos de los vertimientos involucrados, los datos de los límites para el cuerpo hídrico y los datos propios del sistema como el nombre del río, su zona horaria, la fecha de modelación, los métodos de solución de integrales y pH, y la ruta de acceso del archivo en el computador que se correrá la modelación.

Cuando ya se hayan diligenciado las celdas necesarias para la modelación en el software previamente caracterizadas, se procede a analizar las variables respuesta que se fijaron al iniciar la modelación, teniendo en cuenta que para interpretar de una mejor manera los resultados, es importante conocer previamente el funcionamiento del programa como se mencionó en el capítulo anterior.

Los resultados de la modelación asociados a la solución de los balances presentados en el numeral 3.4.2, se encuentran en las tablas de datos de las hojas color verde, mientras que las gráficas de los mismos, se encuentran en las hojas de color rosado.

¹⁶³ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. *Boletín climatológico septiembre 2016*. [Consultado el 14 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/6iSwUU>

¹⁶⁴ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. *Boletín climatológico enero 2017*. [Consultado el 14 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/ZZ7SM6>

A continuación se expondrán y explicarán los resultados obtenidos por el modelo tanto para el periodo de lluvia como para el de sequía, y se relacionarán con las propiedades de la descarga puntual proveniente de la PTARI de la curtiembre en cuestión, para así determinar su afectación o no en el sistema fluvial a tratar.

Después de correr la simulación, ocurre una modificación en las celdas de color verde de primera hoja llamada "QUAL2K" de la interfaz del modelo. Estos cambios corresponden a las características propias de la zona horaria y la solución de los métodos de cálculo de paso.

- **Time zone.** Determinó que para la zona horaria en la que se encuentra Colombia, la opción que se acerca más es la Eastern Standard Time.
- **Program determined calc step.** El cálculo de paso para que todos los cálculos se solucionaran fue de 0,046875 horas.
- **Time of last calculation.** La duración de la última simulación fue de 0,16 minutos.
- **Time of sunrise.** La hora del amanecer solar para Colombia es a las 05:40 AM.
- **Time of solar noon.** La hora del medio día solar para Colombia es a las 11:51 AM.
- **Time of sunset.** La hora del atardecer solar para Colombia es a las 06:02 PM.
- **Photoperiod.** El fotoperiodo para Colombia tiene una duración de 12,37 horas.

4.2.1 Simplificaciones que se tuvieron en cuenta para la modelación. Para que el modelo seleccionado para simular la calidad del agua del río Bogotá representara dicho sistema, era necesario que asumieran y utilizaran aproximaciones matemáticas que han existido desde su primera versión en el siglo pasado hasta hoy. Desde entonces, el modelo ha sido utilizado para predecir los cambios e impactos de las variables de entrada del modelo que están asociadas a la calidad del cuerpo hídrico a tratar y que para el caso particular del presente documento, corresponden a las propiedades fisicoquímicas del agua que se ven afectadas por el vertimiento proveniente del proceso de curtido de pieles que se lleva a cabo en una curtiembre del municipio de Villapinzón. Adicional a esto, el modelo también asume las siguientes simplificaciones:

- No se tiene en cuenta ninguna clase de interacción entre el agua y los sedimentos del río.
- Se asumió a la descarga puntual del vertimiento generado por la PTARI de la curtiembre, como un tributario.
- No se tiene en cuenta la intervención de otros tributarios.
- Se asumió como volumen de control, el que se encuentra contenido entre las estaciones Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar.
- Las diferencia de las fechas de caracterización de la calidad del agua en las estaciones de monitoreo es de un día.

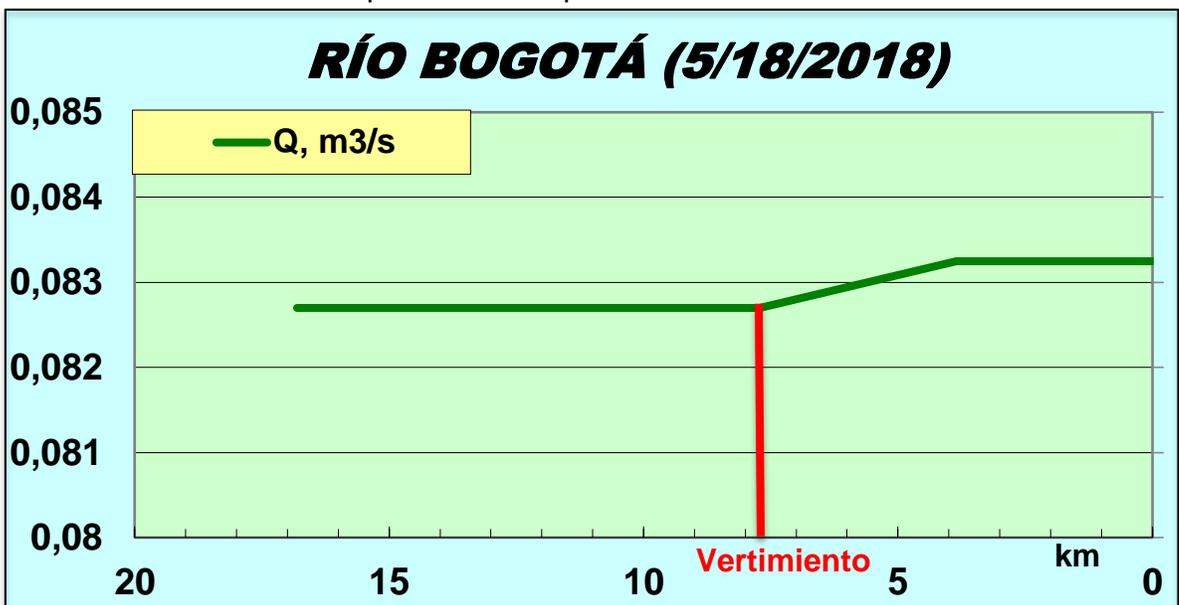
- Se asumió que el único fenómeno de dispersión es el longitudinal que va en la dirección del flujo del río, ya que el software presenta una prelación a la unidimensionalidad.
- No se tiene en cuenta ningún proceso de fotosíntesis, dejando a un lado todo lo que esté asociado a los detritos y el fitoplancton.

4.2.2 Análisis de los resultados obtenidos por el software. A continuación, se expondrán los resultados gráficos obtenidos por las modelaciones de la calidad del agua del río, para las dos épocas del año previamente enunciadas.

4.2.2.1 Caudal. Tanto en la Gráfica 1 como en la Gráfica 2 se puede observar que con el transcurrir del río entre los tramos de estudio, su caudal disminuye incluso después de haber pasado por la descarga puntual de la PTARI de la curtiembre en cuestión; ya que ésta representa el 0,67% y 0,11% del caudal inicial para la temporada de sequía y de lluvia respectivamente.

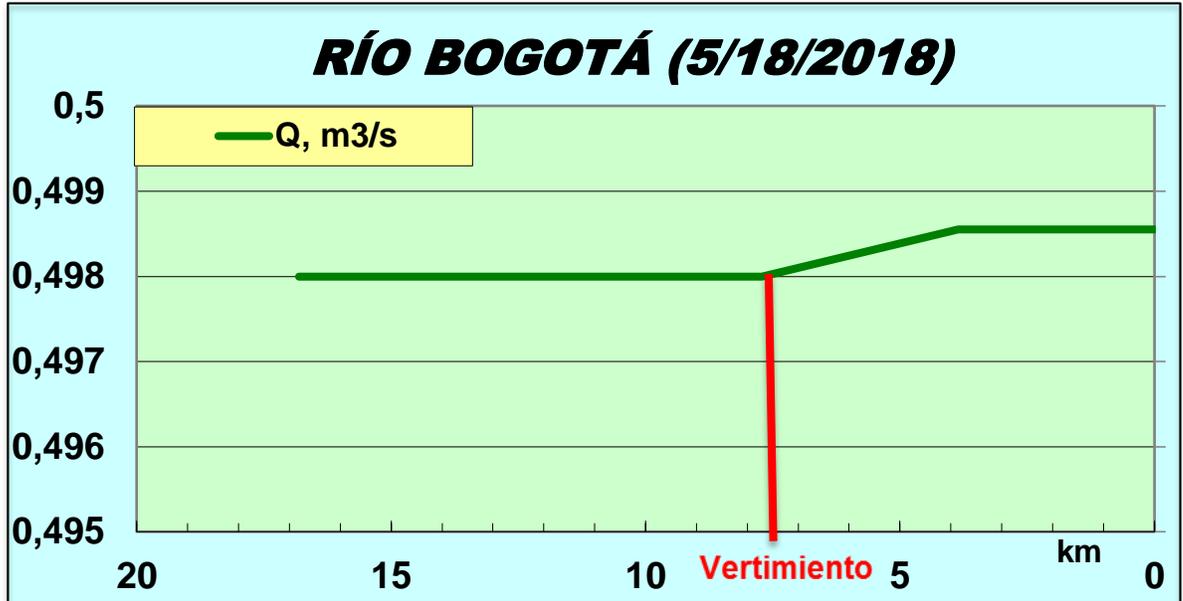
Esta disminución en el caudal del río está asociada al aumento de la distancia entre las costas del efluente. Entre más lejos se está del nacimiento del río, la distancia entre sus riberas también aumenta, trayendo consigo una disminución de la velocidad con la que fluye el agua; y como la velocidad es directamente proporcional al caudal mientras se mantiene un área transversal constante, en consecuencia, el caudal del efluente disminuye proporcionalmente.

Gráfica 1. Caudal en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 2. Caudal en temporada de lluvia.

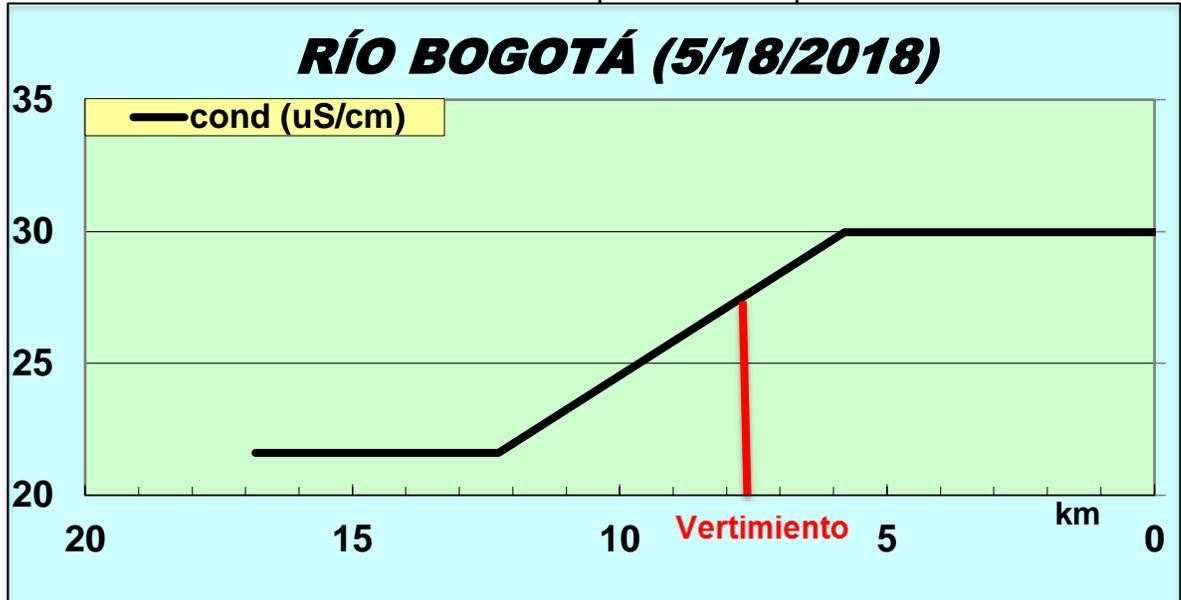


Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.2 Conductividad eléctrica. Tanto en la Gráfica 3 como en la Gráfica 4, se puede apreciar que la conductividad eléctrica del agua del río, disminuye conforme fluye a lo largo del tramo de estudio, tanto para la temporada de sequía como para la de lluvia.

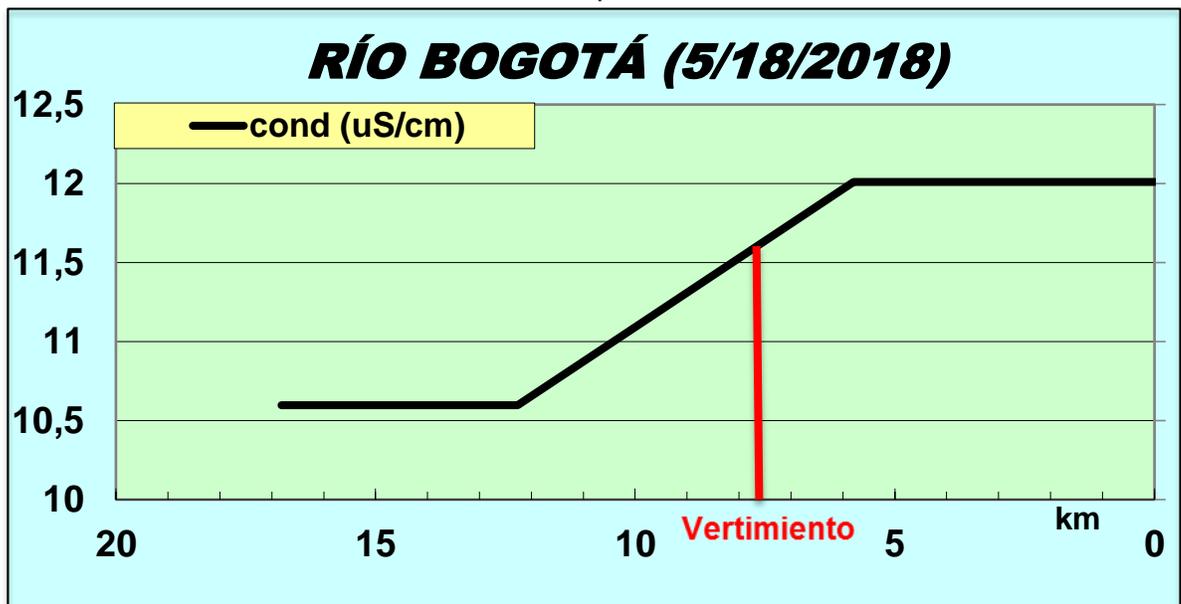
Este comportamiento es fruto de los procesos de autodepuración asociados a los ecosistemas lóticos como los ríos. Estos ecosistemas se caracterizan por ser precursores de la neutralización de los iones que se encuentran disueltos en el sistema, llevándolos a sus estados estables haciéndolos reaccionar entre sí u oxidándolos.

Gráfica 3. Conductividad eléctrica en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 4. Conductividad eléctrica en temporada de lluvia.



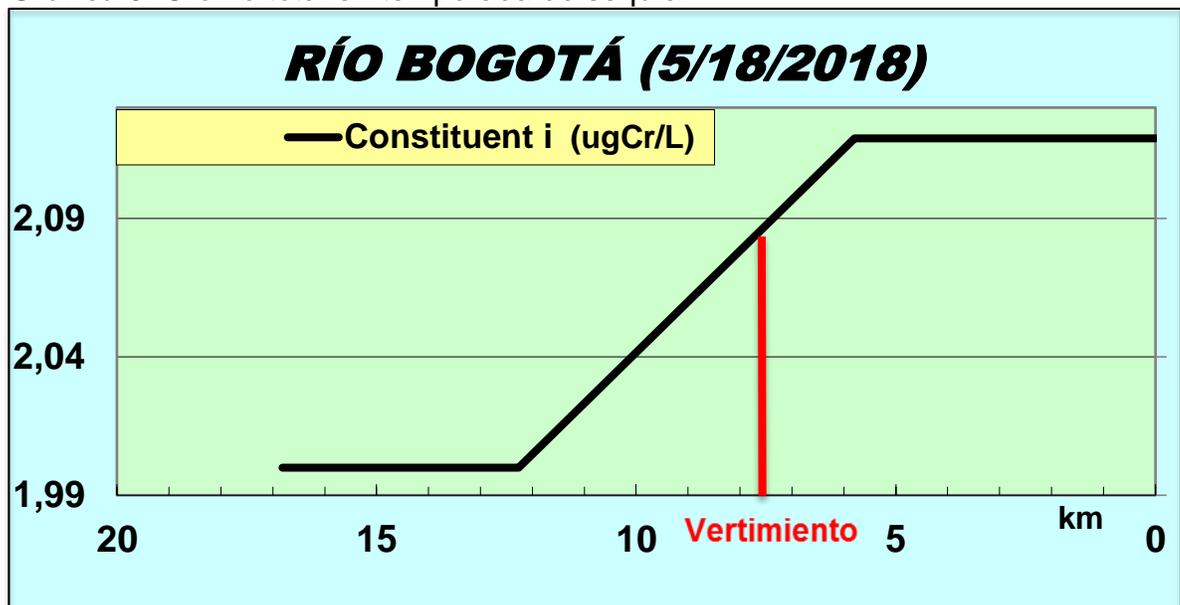
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.3 Cromo total. Tal y como se explicó en el numeral 1.2, los vertimientos de un proceso de curtido de pieles poseen altos niveles de cromo de las sales curtientes que son utilizadas en el proceso productivo, que al ser descargados en una fuente receptora como el río Bogotá, pueden generar perturbaciones graves al ecosistema.

Como el Cromo total no es una variable asociada a la calidad del agua que el modelo de simulación seleccionado contempla inicialmente, es por eso que se le asignó la casilla denominada “*constituent i*”, la cual es una de las tres constituyentes que tiene el sistema para modelar variables que estén por fuera de las que vienen por defecto en el software.

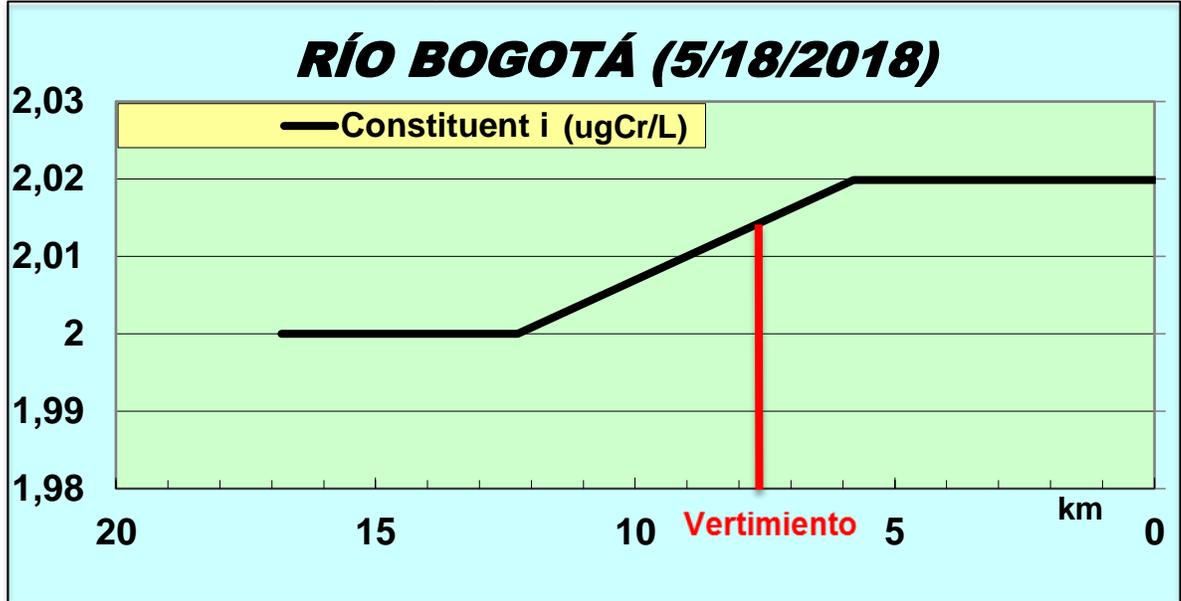
Como se muestra en la Gráfica 5 y en la Gráfica 6, los procesos de purificación propios del río en las dos épocas del año, son efectivos para depurar la concentración de cromo descargada en él, ya que éstos no superan los máximos que están establecidos en la Resolución 0631 de 2015 ni en el Acuerdo 043 de 2006 para las aguas Clase II que son el tipo de aguas a las que pertenece el río Bogotá a esa altura.

Gráfica 5. Cromo total en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 6. Cromo total en temporada de lluvia.



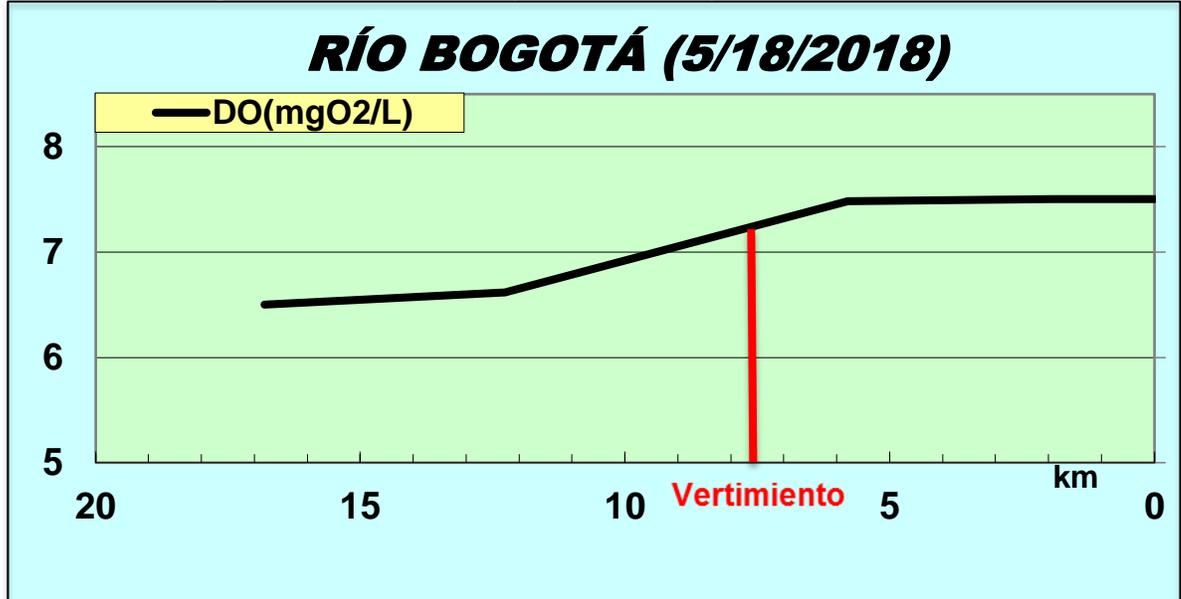
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.4 Oxígeno Disuelto. Como se explicó en el numeral 1.4.4, la determinación del oxígeno disuelto es un factor importante para predecir las condiciones de aerobividad o anaerobividad en los cuerpos de agua¹⁶⁵.

Es por esto que se puede asumir al ver la Gráfica 7 y la Gráfica 8, que la disminución del OD, está directamente asociada al declive en la actividad autodepuradora del río, causada principalmente por la descarga del vertimiento de la curtiembre.

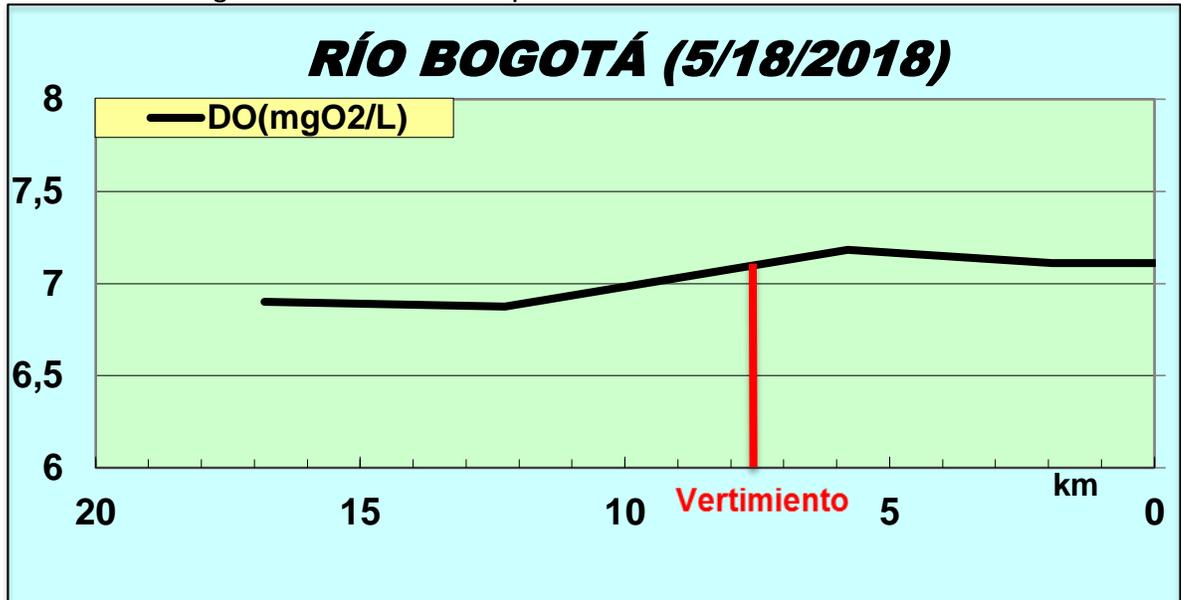
¹⁶⁵ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuiquímica. Op. Cit., p. 106.

Gráfica 7. Oxígeno Disuelto en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 8. Oxígeno Disuelto en temporada de lluvia.



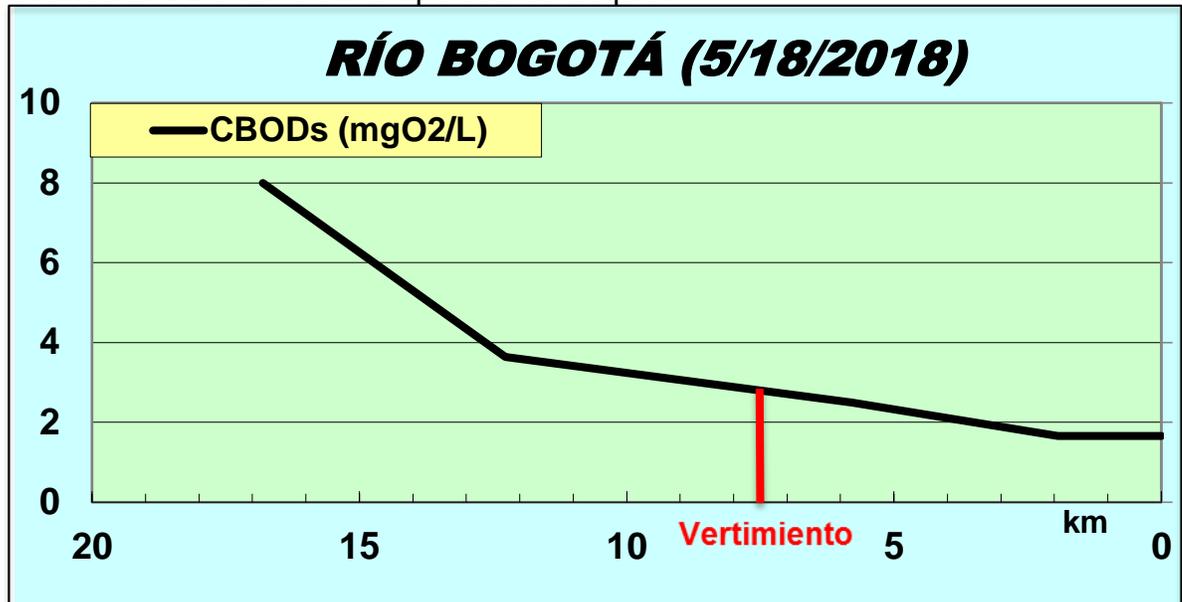
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.5 **DBO lenta.** El modelo QUAL2K no simula directamente la DQO debido a que éste lo contempla indirectamente al modelar la DBO lenta. La DBO lenta es un parámetro que se obtiene por la diferencia entre la DQO y la DBO₅,

representando así al carbono de descomposición lenta presente en las sales, grasas y aceites¹⁶⁶.

Al observar el comportamiento del río en la Gráfica 9 y en la Gráfica 10, se puede concluir que la descarga del vertimiento de la curtiembre contiene altos niveles de materia orgánica que no se puede degradar por vía microbiana, afectando directamente la calidad del agua del tramo en cuestión.

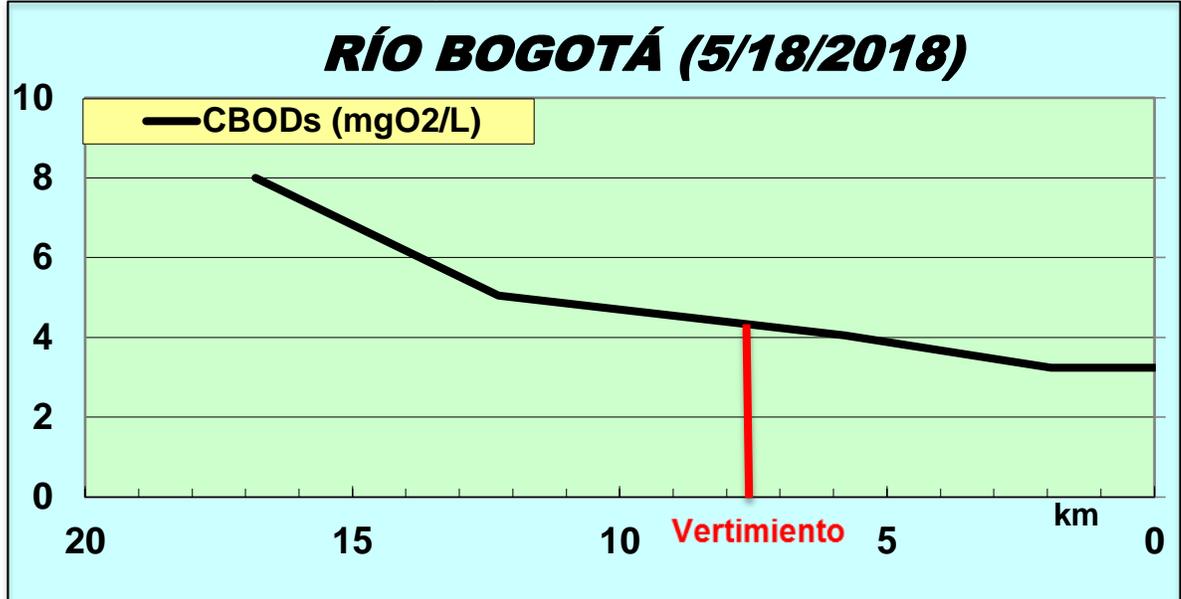
Gráfica 9. DBO lenta en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

¹⁶⁶ CUESTA PARRA, Diana Marcela; VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Environmental assessment related to the sewage water discharge of a tannery Company into a Aburra River. En: Revista UIS Ingenierías. Maro 2018. p. 149.

Gráfica 10. DBO lenta en temporada de lluvia.



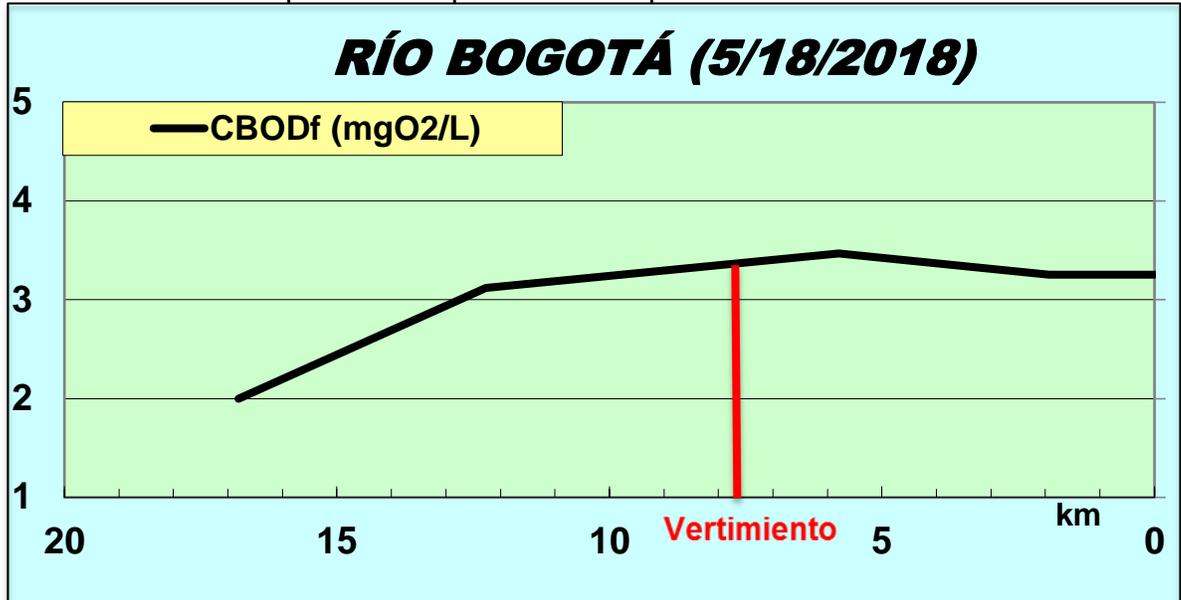
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.6 DBO rápida. Como el modelo QUAL2K modela los parámetros fisicoquímicos del agua en términos de la DBO lenta y la DBO rápida, para el caso de la DBO₅, el modelo la toma como la DBO rápida¹⁶⁷.

Al interpretar el comportamiento del río ante la descarga del vertimiento de la curtiembre, tanto en la Gráfica 11 como en la Gráfica 12 se puede apreciar una disminución de la actividad de la DBO₅ conforme el río fluye por su cauce tanto para la época de sequía como para la de lluvia. Esto se puede explicar debido a que el vertimiento además de tener materia orgánica biodegradable, también cuenta con la presencia de iones sulfuro y cromo.

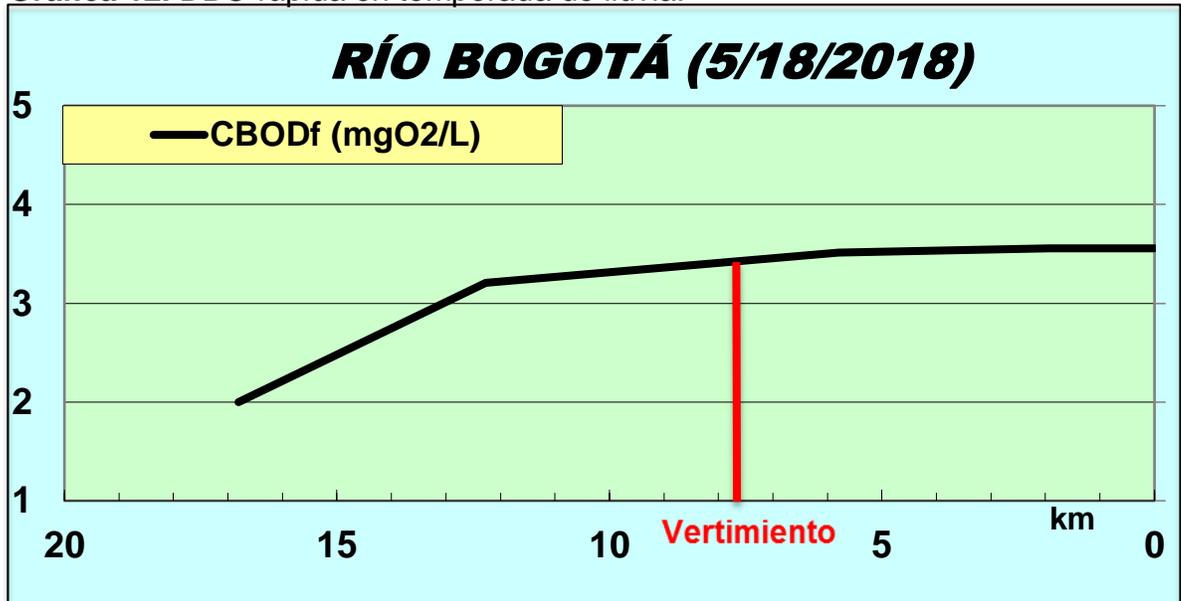
¹⁶⁷ Ibid., p. 148.

Gráfica 11. DBO rápida en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

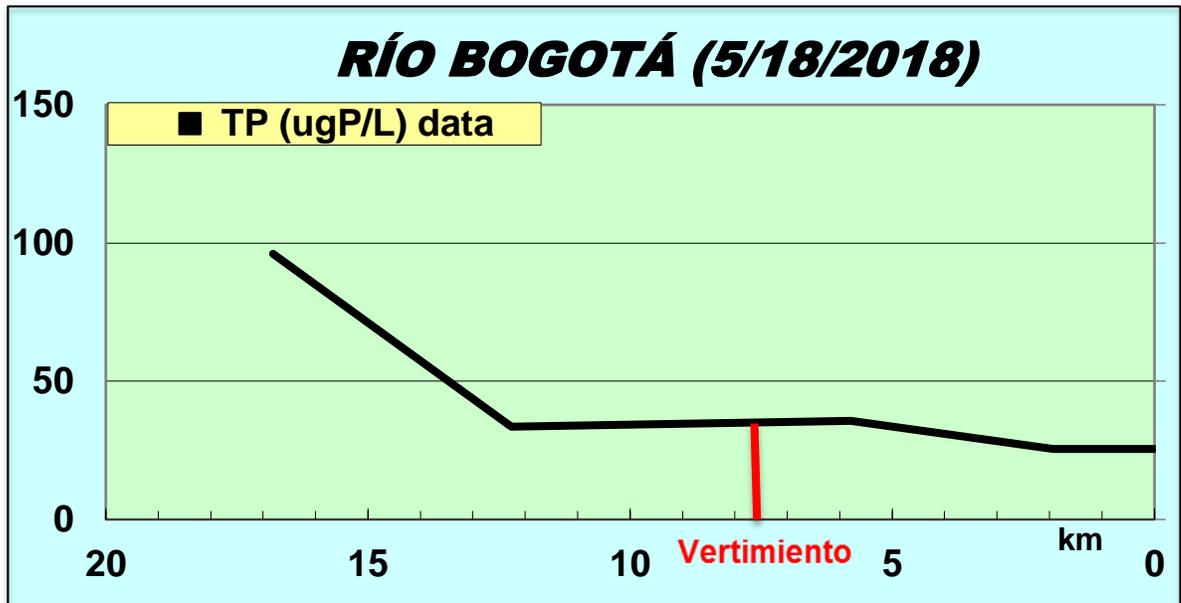
Gráfica 12. DBO rápida en temporada de lluvia.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

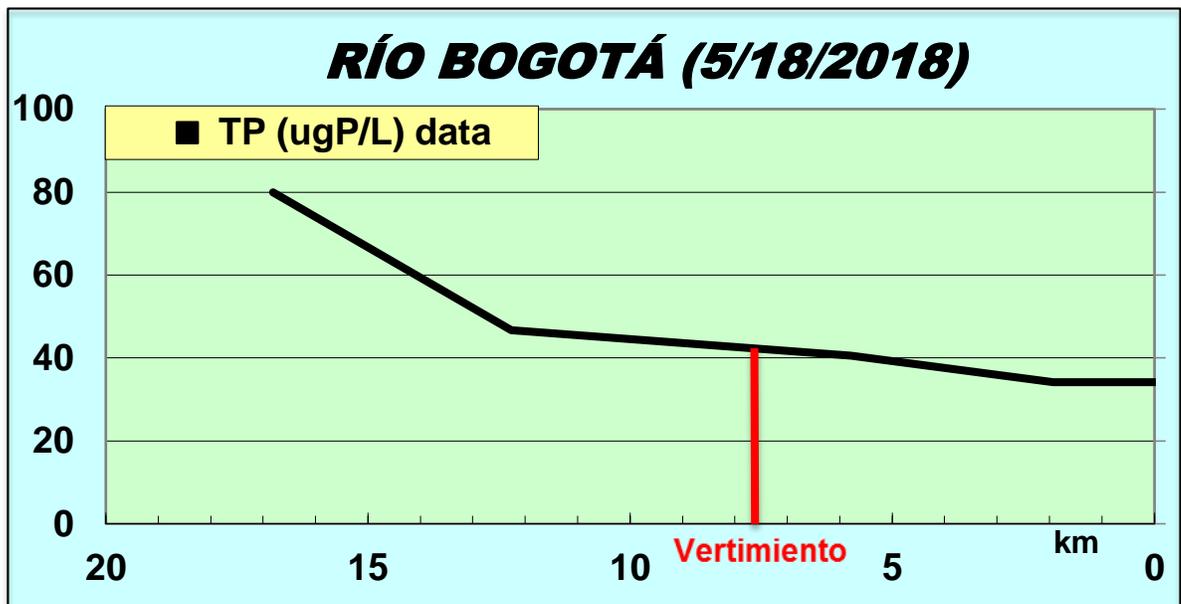
4.2.2.7 Fósforo total. Teniendo en cuenta el proceso productivo explicado en el numeral 1.2 del presente documento, y al ver el comportamiento de la Gráfica 13 y la Gráfica 14, se puede observar que la descarga del vertimiento de la curtiembre al río, afecta negativamente a este cuerpo hídrico, aumentando la concentración de esta variable que está directamente relacionada con los procesos de eutrofización que son perjudiciales para la salud del sistema.

Gráfica 13. Fósforo total en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 14. Fósforo total en temporada de lluvia.

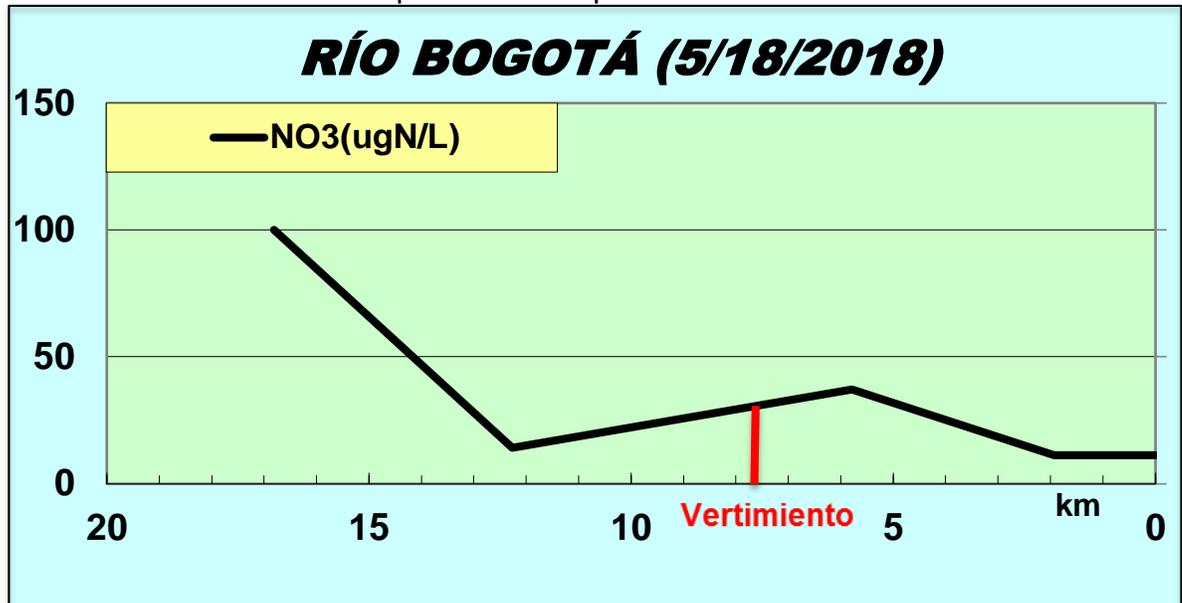


Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.8 **Nitratos.** Conociendo el proceso productivo y al ver el comportamiento de la Gráfica 15 y la Gráfica 16, se puede explicar que la descarga del vertimiento proveniente de la curtiembre, afecta negativamente al río, debido a que aumenta los niveles de nitrógeno por medio de nitratos, que al igual que los del

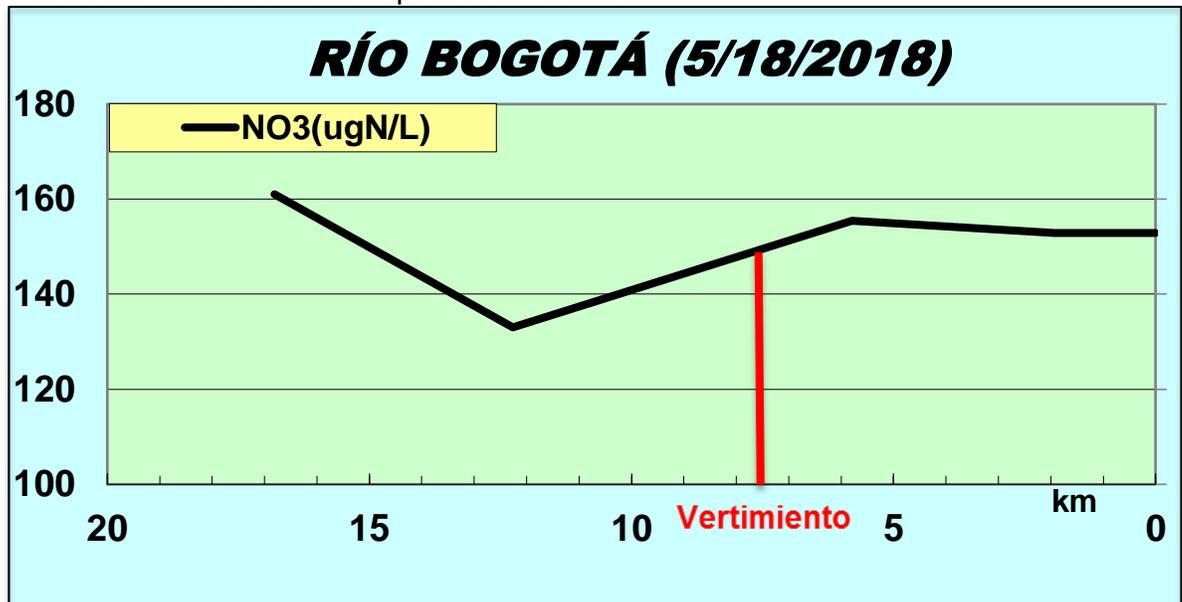
fósforo, está directamente asociados a los procesos de eutrofización del cuerpo de agua.

Gráfica 15. Nitratos en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 16. Nitratos en temporada de lluvia.



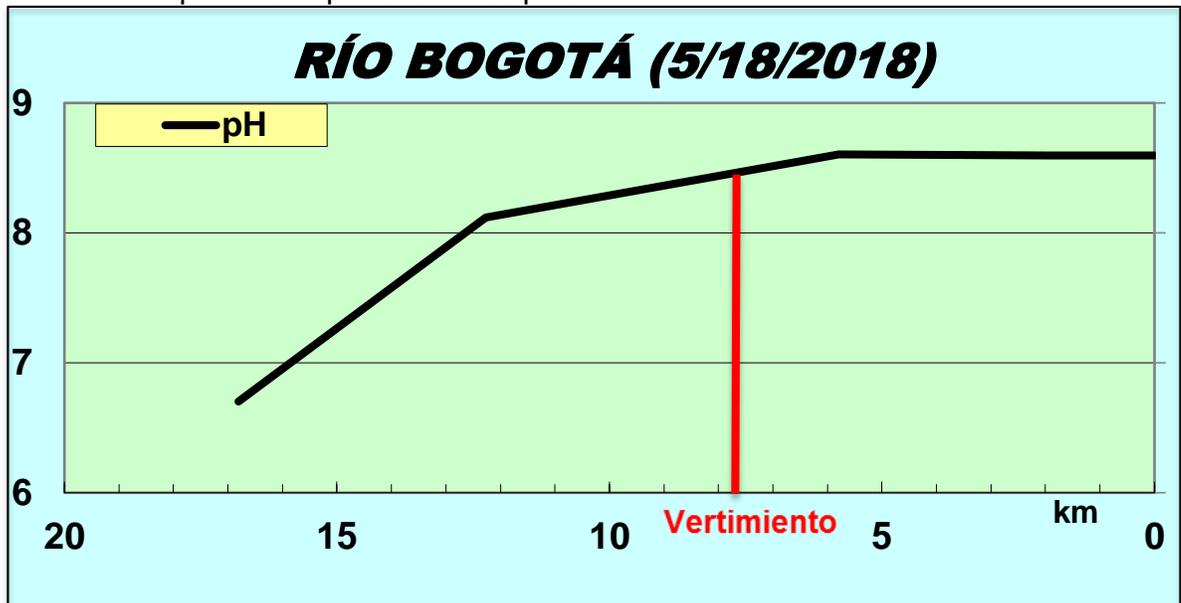
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.9 pH. Al observar la Gráfica 17 y la Gráfica 18, se puede concluir que se presenta una acidificación del agua del río después del kilómetro 7 que es en donde se hace pronunciada la pendiente negativa de la gráfica.

Este comportamiento está asociado directamente a la descarga del vertimiento proveniente de la curtiembre, ya que en el proceso productivo que se lleva a cabo dentro de ésta, involucra ácidos como el sulfhídrico; provocando que su agua de proceso, se encuentre contaminada incluso después de haber pasado por la PTARI.

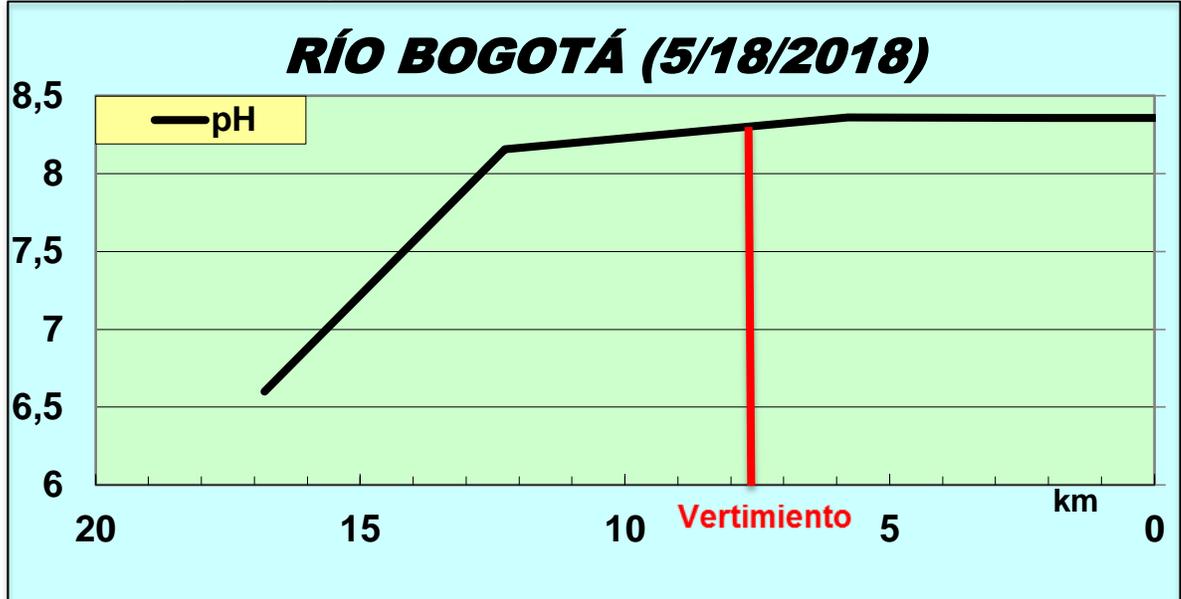
La acidificación del cauce del río, es una de las consecuencias asociadas a la descarga del vertimiento de la curtiembre, debido a que altera los procesos naturales que ocurren dentro de su seno, generando la muerte de diferentes especies que no tienen la capacidad de resistir estas variaciones de pH, llevando al río a ser un flujo de agua sin vida y con malos olores. Esto no solamente ocurre debido a la descarga del vertimiento, sino a las demás descargas ilegales que llegan como tributarios al río y que no se están teniendo en cuenta en este estudio.

Gráfica 17. pH en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 18. pH en temporada de lluvia.

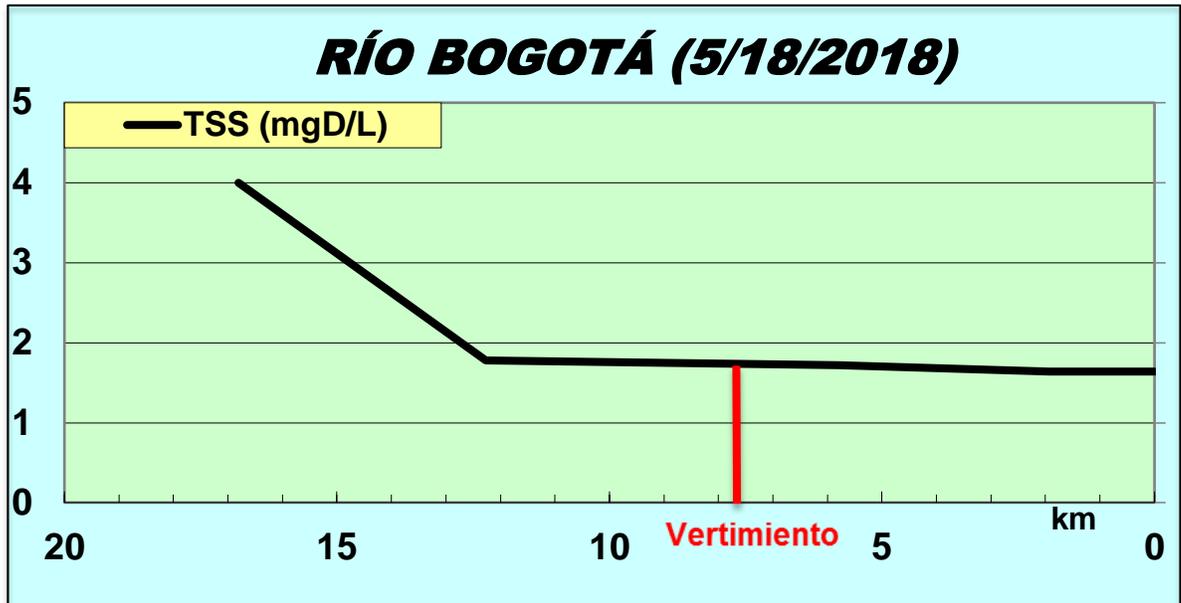


Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.10 Sólidos Suspendidos Totales. Conociendo la naturaleza el proceso productivo de la curtiembre y del río, se puede ver que el comportamiento de la Gráfica 19 y de la Gráfica 20 se debe a que la descarga del vertimiento al río afecta significativamente a la concentración de sólidos suspendidos totales y a que el río no solamente recibe descargas de la empresa en cuestión, sino de otras de similares proporciones.

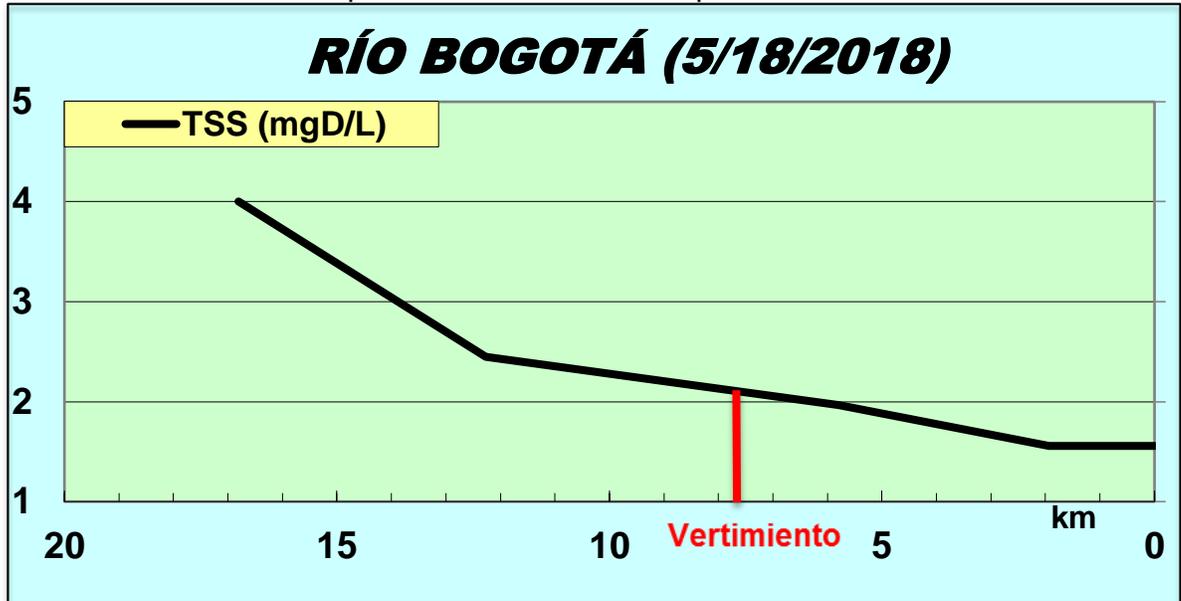
La presencia de estos sólidos en el agua, está relacionada con la disminución de la actividad autodepuradora del río y consecuencia de esto, una pobre calidad del agua de este cuerpo fluvial.

Gráfica 19. Sólidos Suspendidos Totales en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 20. Sólidos Suspendidos Totales en temporada de lluvia.



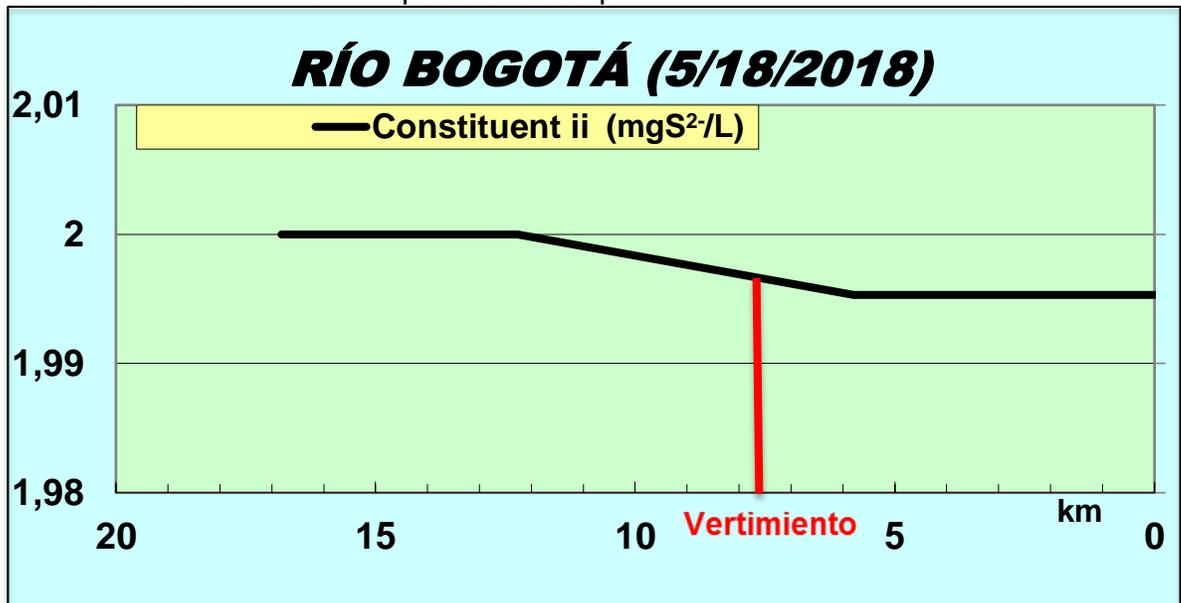
Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

4.2.2.11 Sulfuros. Como se explicó anteriormente en el numeral 1.2, los vertimientos de un proceso de curtido de pieles cuentan con niveles elevados de sulfuros, que al ser descargados en una fuente receptora como el río Bogotá, generan perturbaciones graves al ecosistema.

Como los Sulfuros no son una variable que viene preestablecida en el modelo de simulación seleccionado, se le asignó la casilla denominada “*constituent ii*”, la cual es la segunda de los tres constituyentes que tiene el sistema para modelar variables que estén por fuera de las que vienen por defecto en el software.

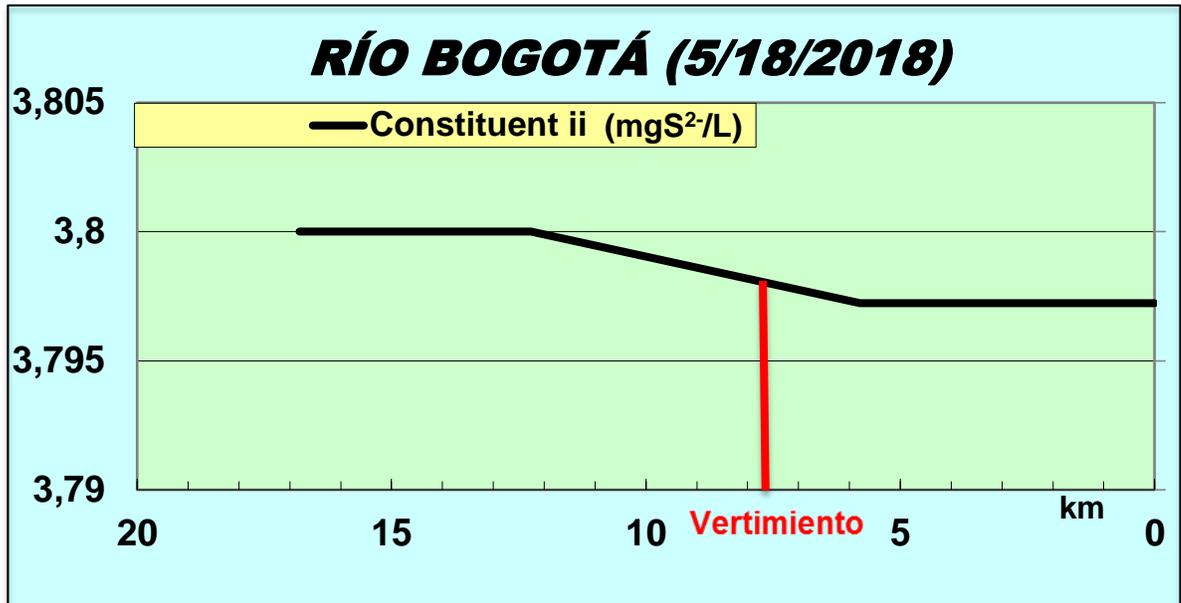
Observando el comportamiento en las temporadas de sequía y de lluvia de la Gráfica 21 y de la Gráfica 22 respectivamente, es posible observar que la descarga del vertimiento de la curtiembre entre el kilómetro 7 y el kilómetro 8, eleva los niveles de sulfuros en el agua del río, que al estar por encima de los límites máximos establecidos en el Acuerdo 043 de 2006 para las aguas Clase II que son el tipo de aguas a las que pertenece el río Bogotá a esa altura, presenta una contaminación que afecta la supervivencia de los seres vivos que tiene por hábitat el río.

Gráfica 21. Sulfuros en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

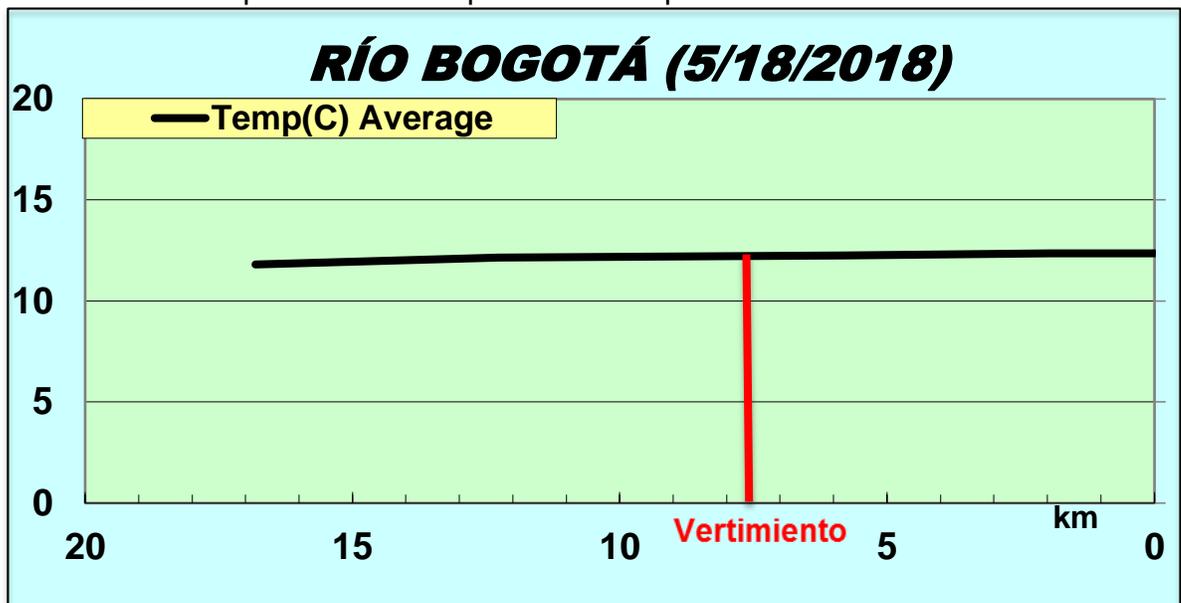
Gráfica 22. Sulfuros en temporada de lluvia.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

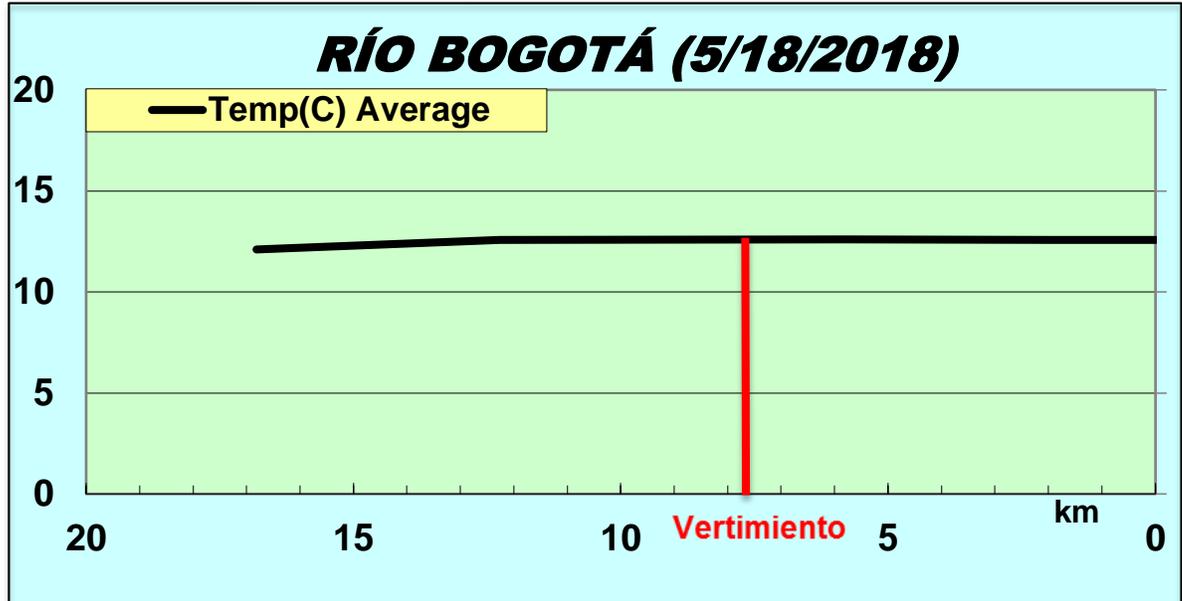
4.2.2.12 **Temperatura.** Teniendo en cuenta la importancia de la temperatura para la supervivencia de los ser vivos que tiene al río por hábitat, se puede observar en la Gráfica 23 y en la Gráfica 24, la temperatura del río conforme avanza en el tramo estudiado, no se ve afectada por la descarga del vertimiento generado en la curtiembre.

Gráfica 23. Temperatura en temporada de sequía.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

Gráfica 24. Temperatura en temporada de lluvia.



Fuente: Elaboración propia. Basado en el software QUAL2K.

5. CONCLUSIONES

- Se seleccionó la conductividad eléctrica, el cromo total, la DBO₅, la DQO, el fósforo orgánico, el fósforo inorgánico, el nitrógeno orgánico, los nitratos, los iones de amonio, el oxígeno disuelto, el pH, los sólidos suspendidos totales, la alcalinidad, los sulfuros y la temperatura, como las variables significativas para la simulación de la calidad del agua producida en un proceso de curtido de pieles; teniendo en cuenta el desarrollo industrial del proceso productivo, la disponibilidad de la información tanto para el río como para la empresa, las variables que son utilizadas a nivel global para la modelación la de calidad del agua y la legislación ambiental que rige al territorio colombiano.
- Se seleccionó el modelo QUAL2K como software de simulación de carácter libre por medio de la matriz de Pugh, cumpliendo con las especificaciones para modelar el impacto producido por el vertimiento industrial al sistema de estudio.
- En las gráficas del comportamiento del río ante el vertimiento de la curtiembre, en cuanto al parámetro Cromo total se refiere, se presenta una pendiente negativa después de la descarga puntual, la cual representa una disminución de la concentración de este parámetro, conforme el río discurre y esto era de esperarse ya que en el punto en cuestión, el agua presenta un valor de 20 µg Cr/L, cuando el límite en el Acuerdo 043 de 2006, para aguas de Clase II, el límite es 50 µg Cr/L, permitiendo concluir que el cuerpo hídrico no se ve afectado por la descarga, al menos por este parámetro.
- En las gráficas que representan el comportamiento del río ante el vertimiento proveniente de la curtiembre, tanto para fósforo total como para nitratos, se evidencia un aumento en la concentración de estos parámetros conforme el cauce del río avanza a lo largo del tramo de estudio, y con esto se puede concluir que aunque el río en el punto de descarga no cumple con límites estipulados por la Resolución 0631 de 2015 en ninguno de los dos casos (ya que el límite de concentración para fosforo total es 1 mg/L y se presenta 1,94 mg/L y para nitratos es 5 mg/L y se presentan 28,7 mg/L), el río recibe vertimientos de otras empresas curtientes del sector que tampoco cumplen con las regulaciones ambientales y superan la capacidad autodepuradora que tiene por naturaleza el río.
- Teniendo en cuenta los resultados gráficos obtenidos por el software QUAL2K para sólidos suspendidos totales y para DBO rápida, se puede observar un aumento y una disminución (representado en pendientes positiva y negativa), respectivamente, en su concentración conforme el río discurre por su cauce. Esto está soportado en que en el estudio de calidad de agua realizado en el punto de descarga, se superan los límites máximos establecidos para SST en la

Resolución 0631 de 2015 en un 26% y para DBO₅ del Acuerdo 043 de 2006 en un 200%.

- En las gráficas obtenidas para sulfuros mediante la modelación, se aprecia un aumento en su pendiente, lo cual se traduce en un aumento de concentración conforme el río avanza por su cauce. Esto es la respuesta a que en el punto de descarga del vertimiento al río, se supera el límite máximo establecido en la Resolución 0631 de 2015 para este parámetro, ya que el límite es 1 mg/L y se presenta un valor de 1,29 mg/L.

6. RECOMENDACIONES

- Revisar el funcionamiento de la PTARI de la curtiembre, ya que la descarga del vertimiento generado en su proceso productivo, generó afectaciones negativas al río Bogotá, asociadas a los altos niveles de DBO₅, fósforo, nitrógeno, SST y sulfuros; que superan los límites máximos permisibles para descargas puntuales en fuentes superficiales de agua, establecidos por la normatividad ambiental que rige al territorio colombiano.
- Estimar la afectación del río Bogotá causada por el mismo vertimiento, con los modelos de calidad del agua que estuvieron cerca de la mejor calificación en la matriz de selección; esto con el fin de realizar una comparación para el mismo sistema, con diferentes modelos.
- Realizar la modelación con modelos de carácter bidimensional y tridimensional con el fin de poder evaluar la diferencia en el análisis para poder determinar si vale o no la pena realizar la modelación con modelos más robustos en cuanto a la modelación matemática se refiere.
- Comparar la modelación hecha en este documento con otras realizadas por medio de distintos modelos de calidad del agua diferentes a QUAL2K, para el mismo tramo del río Bogotá y evidenciar si se llega a la misma conclusión sobre el vertimiento proveniente de la empresa curtiembre.

BIBLIOGRAFÍA

Agenda Samaria. Recorrido del río Bogotá. [Consultado el 01 de diciembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/vVhHKJ>

Alcaldía de Villapinzón - Cundinamarca. *Nuestro municipio*. [Consultado el 30 de noviembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/A94MRe>

ARANGO ESCOBAR, Carlos Alberto; ARAGÓN GUZMÁN, Mónica y ALZATE TEJADA, Adriana María. Sistema De Referenciación SIRAC Para El Sector Curtiembre En Colombia: Proyecto Gestión Ambiental En La Industria De Curtiembre En Colombia. Medellín: Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2004. p. 22.

BAILEY D, Bill y LEE, Jan. Decide and conquer a Pugh matrix can help teams appraise situations, evaluate choises. En: Quality Progress. Abril 2016. p. 32.

CARABIAS LILLO, Julia; PROVENCIO, Enrique y CORTINAS DE NAVA, Cristina. Manual De Procedimientos Para El Manejo Adecuado De Los Residuos De La Curtiduría. Instituto Nacional de Ecología. México D.F: 1999. p. 32.

CÁRDENAS, Gustavo y CÁRDENAS, Jeannette. Agricultura, Urbanización Y Agua. Montevideo, Uruguay: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2009. p. 13.

CARREÑO SAYAGO, Uriel Fernando y MÉNDEZ SAYAGO, Jhon Alexander. Estimación de la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan con lagunas de estabilización en la cuenca alta y media del río Bogotá. Junio 2011. En: Universidad Del Valle. p. 11.

CASTRO HUERTAS, Mayra Andrea. Aplicación del QUAL2KW en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2015. p. 20.

CERVONE H, Frank. Managing digital libraries: The view from 30000 feet applied digital library project management using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations. En: OCLC Systems & Services: International digital library perspectives. Junio 2009. p. 228.

CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J. y TAO, H. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality (Version 2.11). Documentation and User's Manual. Tufts University, Medford, MA: Civil and Environmental Engineering Dept., 2012. p. 9.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio. p. 8.

_____. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI –Parte III – Libro II del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos y de dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: Ministerio. p. 17.

_____. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Acuerdo 043 De 2006. Por el cual se establecen los objetivos de calidad de agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. Bogotá. Consejo Directivo. p. 1.

COOMAN, K., et al. Tannery wastewater characterization and toxicity effects on *Daphnia* spp. En: ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY. vol. 18, no. 1, p. 45-51

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. *Así es el río Bogotá*. [Consultado el 10 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/6TFhd3>

_____. Boletín calidad hídrica 2014: Informe de seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad. Bogotá D.C. 2015. p. 32.

_____. Integración De Sistemas De Alertas Tempranas Y Comité Hidrológico. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2011. p. 21.

_____. Río Bogotá: Adecuación hidráulica y recuperación ambiental. Bogotá D.C.: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2009. 88-104

COX A, B. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. En: The science of the Total Environment. Enero 2003. p. 338.

CUESTA PARRA, Diana Marcela; VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Environmental assessment related to the sewage water discharge of a tannery Company into a Aburra River. En: Revista UIS Ingenierías. Maro 2018. p. 149.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, - DANE. Boletín Técnico Encuesta de Sacrificio de Ganado. Bogotá D.C.: 2017.

DIAZ VARGAS, Chrispy Alexander y VARGAS BORDA, Oscar Andrés. Ingeniería Básica De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De La Curtiembre Distriequinos La Herradura. Fundación Universidad de América, 2009. p. 56.

Diccionario de la Real Academia Española. *Definición de difundir*. [Consultado el 18 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/V22gmM>

Dirección de monitoreo, modelamiento y laboratorio ambiental. Parámetros De Calidad Del Río Bogotá. Certificado: Envío documento No. 20172157207 (*certimail*). [online]. mensaje a: Juan Felipe Soto Moya. Bogotá D.C.: 2017. Personal Communication.

DIXIT, Sumita, *et al.* Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *En: Journal of Cleaner Production*. Enero 2014, p. 39.

FERRERA BATISTA, Daiane and PEREIRA CABRAL, João Batista. Modelos matemáticos para avaliação do índice de qualidade de água: uma revisão . *En: UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS*.

GIL RODRÍGUEZ, Manuel. Procesos De Descontaminación De Aguas: Cálculos Informatizados Avanzados. España: Thomson Editores, 2005. p. 47.

HERRERA P, Andrés Mauricio. Ingeniería de Manufactura. Bogotá D.C.: 2017. p. 2.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. 1 ed. El instituto 1998. 23 p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Aguas superficiales. [Consultado el 01 de diciembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/TbkRir>

_____. *Boletín climatológico enero 2017*. [Consultado el 14 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/ZZ7SM6>

. *Boletín climatológico septiembre 2016*. [Consultado el 14 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/6jSwUU>

Conductividad Eléctrica En Agua. 2006. p. 2.

ISAZA M., José Hipólito. Taninos o polifenoles vegetales. En: *Scientia Et Technica*. Mayo 2007, p. 15.

KLETZ, Trevor Asher. What you don't have, can't leak. En: *Chemistry and Industry*. Agosto 2013. p. 43.

LOFRANO, Giusy, et al. Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: a review. En: *The Science of the Total Environment*. Septiembre 2013, p. 265.

LONDOÑO CARVAJAL, Adela; GIRALDO GÓMEZ, Gloria Inés and GUTIÉRREZ GALLEGU, Adamo Alexander. Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Primera edición ed. Manizales: Editorial Blanecolor Ltda, 2010. 113-125 p.

LÓPEZ LÓPEZ, Antonio. Evaluación Completa De La Exposición a Contaminantes Químicos Por Vía Inhalatoria. Universitas Miguel Hernández, 2015. p. 9.

LÓPEZ, Iván Darío; FIGUEROA, Apolinar and CORRALES, Juan Carlos. Un mapeo sistemático sobre predicción de calidad del agua mediante técnicas de inteligencia computacional. En: *REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN*. p. 3-18

LOZANO, G; PEÑA, L y ZAPATA, M. Modelación de Corrientes Hídricas Superficiales en el Departamento del Quindío, Colombia. En: *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. p. 47.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Avanza recuperación ambiental, social, cultural y económica del Río Bogotá*. [Consultado el 01 de diciembre de 2017]. Disponible en: <https://goo.gl/2UBvnp>

MOTT, Robert. *Mecánica De Fluidos Aplicada*. Cuarta ed. México: Pearson Education, 1996. p. 351.

MUHAMAD GONZÁLEZ, María Susana y ACERO AGUIRRE, Alberto. *Guía De Producción Más Limpia Para El Sector Curtiembres De Bogotá: Enfoque En*

Vertimientos Y Residuos. Bogotá D.C.: Secretaría Distrital de Ambiente, 2015. p. 23.

NAJAH, *et al.* Application of artificial neural network for quality prediction. En: Neural Computing and Applications. Abril 2012. p. 187.

NIETO ESCALANTE, Juan Antonio; ABISAMBRA VESGA, Samir José and ÁLVAREZ LUCERO, German Darío. Guía para la gestión y manejo integral de residuos: Industria de Curtiembres y Tanerías. Bogotá D.C.: 2010. 74-82.

PARK, Seok Soon y LEE, Yong Seok. A water quality Modeling Study of the Nakdong River, Korea. En: Ecological Modeling. Noviembre 2001. p. 65.

PELLETIER, Gregory P.; CHAPRA, Seteve C. and TAO, Hua. QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. En: ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE. no. 21, p. 419-425

PEÑA GUZMÁN, Carolina. Procesos de monitoreo a la calidad hídrica del Río Bogotá realizados por la corporación autónoma regional de Cundinamarca - CAR. Pontificia Universidad Javeriana, 2010. p. 26-30.

PUGH, Stuart. Total design: Integrated methods for successful product engineering. 1991. Addison- Wesley Publishing Company. p. 121.

RÉBAK, Gladis I.; CAPELLARI, Adriana y REVIDATTI, María A. Peso Y Rendimiento De Subproductos Incomestibles Y Cuero Resultantes De La Faena De Novillos De 22 a 24 Meses, 3/8 Y 5/8 Cebú X Hereford, Tipo Cebú Y Tipo Hereford Del Noreste De Corrientes. Universidad Nacional del Nordeste. 2003. p. 2.

RÍOS POZO, Juan Eduardo and SÁNCHEZ NICHÓ, Wilder Johans. Prevención y control de la contaminación en la industria manufacturera sub-sector curtiembre, implementando un programa de producción más limpia en la empresa Quimipiel S.A.C. Universidad Nacional de Trujillo, 2006. p. 60-98.

ROA BARACALDO, Viviana Andrea. Análisis de la calidad del agua del río Bogotá en el sector de Cajicá y municipios vecinos. Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada, 2013. p. 15-20.

ROJAS AMAYA, Franklin Vicente. Estudio Económico-Financiero Del Aprovechamiento De Las Grasas Extraídas Del Residuo De Descarne "unche" Derivado Del Proceso De Curtición En El Municipio De Villapinzón – Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia, 2010. p. 24.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuíquímica. Bogotá D.C. 1996. Escuela Colombiana de Ingeniería. p. 58.

_____. Calidad del agua. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. 2009. p. 356.

_____. Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría Y Principios De Diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. p. 38.

SARAVANABHAVAN, S., et al. A one-bath chrome tanning together with wet-finishing process for reduced water usage and discharge. En: Clean Technologies and Environmental Policy. Julio 2005, p. 170.

SILVA BUÑAY, Diego Stalin. Obtención Del Cuero Para Guantería Fina Con La Utilización De Diferentes Niveles De Aldehídos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2015. p. 16.

SOKOLOV, Seguei y BLACK P, Kerry. Modelling the evolution of water-quality parameters in a river: Yarra River, Australia. En: Journal of Hydrology. Abril 1995. p. 311.

SUÁREZ PÉREZ, Sandra; AMAYA NAVAS, Oscar Darío y SOTO CASTAÑO, Liliana María. Guía Ambiental Para La Industria Del Curtido Y Preparado De Cueros. Segunda edición ed. Bogotá D.C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2006. p. 25.

SUNDRI MIRELA, Iuliana. Computer models in actual environmental engineering education. En: CONSTANTA MARITIME UNIVERSITY. vol. 12, no. 15, p. 1-8

TCHOBANOGLIOUS, George y TRILLO MONTSORIU, Juan de Dios. Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación Y Reutilización De Aguas Residuales. Barcelona: Editorial Labor, 1994. p. 93.

VELAZCO RINCÓN, Carol Lorena y CASTRO PARDO, Julián Camilo. Modelación De La Calidad De Agua Del Vertimiento En Un Proceso De Curtido. Fundación Universidad de América, 2017. p. 25.

VATANKHAH, Ali R. and EASA, Said M. Simplified Accurate Solution for Design of Erodible Trapezoidal Channels. En: Journal Of Hydrologic Engineering. Noviembre 2011, p. 961.

VILLENA MOZO, Marco Antonio. Efecto De La Concentración De Tres Engrasantes En Las Propiedades Físicas Del Cuero Vacuno Curtido Al Cromo. Universidad Nacional de Trujillo, 2013. p. 7.

YASSERI, Sirous y BAHAI, Hamid. Decision-support tools for selection of pipeline corrosion coatings. En: The Journal of Pipeline Engineering. 2017. p. 101.

ANEXOS

**ANEXO A.
RESOLUCIÓN 0631 DE 2015.**

Tabla A1. Valores límite máximos establecidos en la resolución 0631 de 2015 para vertimientos provenientes del sector curtiembres.

| PARÁMETRO | UNIDADES | VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE |
|--|---------------------|--|
| Generales | | |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 200 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 50 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 50 |
| Sólidos Sedimentables (SSED) | mg/L | 1 |
| Material Flotante | mg/L | 0,5 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 10 |
| Fenoles | mg/L | 0,1 |
| pH | Unidades de pH | 6 a 8,5 |
| Temperatura | °C | Diferencia menor a 5°C valor absoluto |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) | mg/L | 4 |
| Hidrocarburos | | |
| Hidrocarburos Totales (HTP) | mg/L | 2 |
| Hidrocarburos aromáticos Polinucleares (HAP) | mg/L | 0,05 |
| BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) | µg/L | 20 |
| Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX) | mg/L | 0,05 |
| Nutrientes | | |
| Fósforo Total (P) | mg/L | 1 |
| Compuestos de Nitrogenados | | |
| Nitratos (N-NO ₃) | mg/L | 5 |
| Nitritos (N-NO ₂) | mg/L | 2 |
| Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) | mg/L | 5 |

Tabla A1. (Continuación)

| PARÁMETRO | UNIDADES | VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE |
|---|-----------------|---------------------------------------|
| Nitrógeno Total (N) | mg/L | 15 |
| Iones | | |
| Cianuro (CN ⁻) | mg/L | 0,1 |
| Cloruros (Cl ⁻) | mg/L | 500 |
| Fluoruros (F ⁻) | mg/L | 5 |
| Sulfatos (SO ₄ ²⁻) | mg/L | 500 |
| Sulfuros (S ²⁻) | mg/L | 1 |
| Metales y Metaloides | | |
| Aluminio (Al) | mg/L | 1,5 |
| Arsénico (As) | mg/L | 0,1 |
| Bario (Ba) | mg/L | 1 |
| Boro (B) | mg/L | 1 |
| Cadmio (Cd) | µg/L | 2 |
| Cinc (Zn) | mg/L | 0,2 |
| Cobalto (Co) | mg/L | 0,1 |
| Cobre (Cu) | mg/L | 0,5 |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,2 |
| Estaño (Sn) | mg/L | 1 |
| Hierro (Fe) | mg/L | 3 |
| Manganeso (Mn) | mg/L | 2 |
| Mercurio (Hg) | µg/L | 1 |
| Molibdeno (Mo) | mg/L | 0,5 |
| Níquel (Ni) | mg/L | 0,02 |
| Plata (Ag) | mg/L | 0,05 |
| Plomo (Pb) | mg/L | 0,03 |
| Selenio (Se) | mg/L | 0,1 |
| Vanadio (V) | mg/L | 0,05 |

ANEXO B.
ACUERDO 043 DE 2006.

Tabla B1. Valores límite máximos establecidos en el acuerdo 043 de 2006 para vertimientos en aguas clase II.

| PARÁMETRO | UNIDADES | VALOR LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE |
|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Parámetros Orgánicos | | |
| Demanda Química De Oxígeno (DQO) | mg/L | 7 |
| Oxígeno Disuelto (OD) | mg/L | >4 |
| Coliformes Totales | UFC/100 mL | 20000 |
| Parámetros Nutrientes | | |
| Nitratos (N-NO ₃) | mg/L | 10 |
| Nitritos (N-NO ₂) | mg/L | 10 |
| Sólidos | | |
| Sólidos Suspendidos (SS) | mg/L | 10 |
| Parámetros de Interés Sanitario | | |
| Amoniaco (NH ₃) | CL 96/50 | 1 |
| Arsénico (As) | CL 96/50 | 0,05 |
| Bario (Ba) | CL 96/50 | 1 |
| Berilio (Be) | CL 96/50 | 0,1 |
| Cadmio (Cd) | CL 96/50 | 0,01 |
| Cianuro (CN) | CL 96/50 | 0,2 |
| Cinc (Zn) | CL 96/50 | 2 |
| Cloruros (Cl) | mg/L | 250 |
| Cobalto (Co) | mg/L | 0,05 |
| Cobre (Cu) | CL 96/50 | 0,2 |
| Color | Unidades escala Platino - Cobalto | 75 |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,05 |
| Fenoles | mg/L | 0,002 |
| Mercurio (Hg) | mg/L | 0,002 |
| pH | Unidades | 5 a 9 |
| Plata (Ag) | mg/L | 0,05 |
| Plomo (Pb) | mg/L | 0,05 |
| Policlorobifenilos (PCB) | Concentración de agente activo | No detectable |
| Selenio (Se) | mg/L | 0,01 |
| Sulfatos (SO ₄ ²⁻) | mg/L | 400 |
| Tensoactivos | mg/L | 0,5 |
| Vanadio (V) | mg/L | 0,1 |

ANEXO C. MATRIZ DE SELECCIÓN.

Tabla C1. Resultados de la matriz de selección del modelo de calidad del agua para la simulación del impacto generado en el río bogotá, por el método de Pugh.

| Criterios de selección | Importancia | Modelos de calidad del agua | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|-----------------------------|------|------|----------|-------|------|------|--------|---------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|------|
| | | BIOPLUME | BLTM | EFDC | EPD-RIV1 | EXAMS | HSPF | ISIS | MIKE11 | MODFLOW | PLOAD | QUAL2E | QUAL2K | QUAL2KW | QUASAR | SIMCAT | TOMCAT | WASP |
| Costo | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 1 |
| Parámetros modelados | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Manual del usuario y soporte | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Presición | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Referentes bibliográficos | 2 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Usos del modelo | 2 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| Dimensiones | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Variabilidad temporal | 1 | 0 | -1 | 1 | 1 | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Total | | 11 | 7 | 4 | 4 | 11 | 14 | 4 | 10 | 6 | 9 | 11 | 17 | 13 | 10 | 7 | 6 | 12 |

**ANEXO D.
EQUIPOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.**

Tabla D1. Equipos y métodos de medición de la calidad fisicoquímica del agua en las estaciones de monitoreo Aguas arriba Villapinzón y Río Tejar

| PARÁMETRO | UNIDADES | MÉTODO ANALÍTICO |
|-------------------------------|-------------------------|--|
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | Titulación potenciométrica (SM 2320 B) |
| Conductividad | μS/cm | Electrométrico, SM 2510 B |
| Cromo Total | μg Cr/L | Digestión Ácido Nítrico, Espectroscopía de Masas / Plasma Acoplado Inductivamente (ICP/MS), SM 3030 E, 3125 B. |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg O ₂ /L | Incubación a 5 días y Electrodo de Membrana, SM 5210 B, 4500-O G |
| Demanda Química de Oxígeno | mg O ₂ /L | Reflujo Abierto (SM 5220 B) Modificado-menor cantidad Reactivos |
| Fósforo Inorgánico | mg P/L | Ácido Ascórbico (SM 4500-P E) |
| Fósforo Orgánico | mg P/L | Digestión Ácida - Ácido Ascórbico, SM 4500-P B, E |
| Nitratos | mg NO ₃ /L | Colorimétrico Ácido Cromotrópico (SM 418 D - Ed 16) |
| Nitrógeno Amoniacal | mg NH ₃ /L | colorimétrico-Nessler (SM 417 B - Ed. 16) |
| Nitrógeno Orgánico | mg N/L | Macro-Kjeldahl, Destilación y Volumetría, SM 4500-NOrg B y SM 4500-NH ₃ B, C |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | Electrodo de membrana (4500-O G) |
| pH | Unidades de pH | Electrométrico (SM 4500 H+- B) |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg SST/L | Gravimétrico – Secado a 103-105°C, SM 2540 D |
| Sulfuros | mg S ²⁻ /L | Yodométrico, SM 4500-S -2 F - Sin Filtración |