

**Evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales del casco urbano del
municipio de Gachetá sobre el río Guavio**

Brighi Dayana Beltrán Martín

Yarid Marcela Rodríguez Urrego

Proyecto Aplicado Presentado Como Requisito Para Optar Al Título De:

Ingeniería Ambiental

Asesora:

Jessica Paola Páez Pedraza

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

CEAD Gachetá

Año 2020

Agradecimientos

Agradecemos de forma conjunta a nuestra institución educativa, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, por brindarnos el conocimiento y las herramientas necesarias para poder entender y analizar las condiciones ambientales de nuestro territorio.

Así mismo, agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional en el desarrollo de nuestra formación superior.

Resumen

El casco urbano del municipio de Gachetá descarga sus aguas residuales al Río Guavio sin tratamiento alguno, por lo que se tiene contemplada la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para reducir el impacto ambiental ocasionado. De modo que en este proyecto de grado se analizan las implicaciones derivadas de la descarga del casco urbano, con el fin de establecer el nivel de impacto en distintos escenarios mediante un modelo matemático que contempla condicione críticas y además se comparan los escenarios en cuanto a calidad y costos, para establecer el grado de afectación por la descarga y los costos relacionados con la tasa retributiva.

Palabras claves: Calidad, Vertimiento, Tratamiento, Tasa retributiva.

Abstract

The urban area of the municipality of Gachetá discharges its wastewater to the Guavio River without any treatment, for which reason the construction of a wastewater treatment plant is contemplated to reduce the environmental impact caused. So in this degree project, we analyze the implications derived from the discharge of the urban area, in order to establish the level of impact in different scenarios through a mathematical model that contemplates critical conditions and also compares the scenarios in terms of quality and costs, to establish the degree of affectation by the shedding and the costs related to the remuneration rate.

Keywords: Quality, Shedding, Treatment, Remuneration rate.

Tabla de contenido

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Lista de tablas.....	7
Tabla de figuras	8
Introducción.....	9
Planteamiento del problema.....	11
Justificación.....	12
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos:	14
Marco teórico	15
Aguas residuales	15
Vertimiento	16
Tratamiento de aguas residuales	18
Impacto ambiental por vertimientos	20
Evaluación del impacto ambiental por vertimientos	21
Tasa retributiva	23
Representatividad de los datos	24
Caso de estudio	26
Metodología	34
Características del agua residual	36
Determinación de concentraciones	37
Datos prospectivos	39
Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor	40
Determinación de la zona de mezcla	40
Determinación del caudal disponible para la dilución	42
Balance de masas	42
Cálculo de ICA	43
Cálculo de tasa retributiva	44

Resultados y discusión	46
Características del agua	46
Determinación de concentraciones	50
Datos prospectivos	52
Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor	57
Zona de mezcla	63
Determinación del caudal disponible para la dilución	67
Balance de masas, Cálculo de ICA y Cálculo de tasa retributiva	68
Balance de masas.	69
8.7.2. ICA.....	70
8.7.3. Tasa retributiva.....	75
Conclusiones	86
Recomendaciones	89
Bibliografía	90

Lista de tablas

Tabla 1: Concentraciones Río Guavio y Vertimientos	32
Tabla 2: Escenarios	35
Tabla 3: variables y ponderaciones para ICA de 6 parámetros	43
Tabla 4: Carga contaminante de DBO5 en estiaje	46
Tabla 5: Carga contaminante de DBO5 en lluvias.....	46
Tabla 6: Parámetros y LMP	47
Tabla 7: Concentraciones ponderadas y con tratamiento	50
Tabla 8: Población censada y proyectada	52
Tabla 9: Caudales proyectados.....	54
Tabla 10: Datos del perfil transversal del Río Guavio, sector Puente Reyes	57
Tabla 11: Profundidad de secciones	60
Tabla 12: Zona de mezcla	63
Tabla 13: Balance de masas	69
Tabla 14: Cálculo de ICA.....	71

Tabla de figuras

Figura 1: Vertimientos. Fuente: Google Earth.....	26
Figura 2: Localización del matadero municipal. Fuente: Google Earth.....	27
Figura 3: Predio PTAR y recorrido. Fuente: Google Earth	28
Figura 4: Esquema de localización de la PTAR. Fuente: Google Earth.....	29
Figura 5: Imagen satelital Gachetá y Embalse del Guavio. Fuente: Google Earth.....	30
Figura 6: Puntos de monitoreo. Fuente: Google Earth	31
Figura 7: Perfil transversal del Río Guavio antes del vertimiento.....	62
Figura 8: Perfil transversal del Río Guavio después del vertimiento.....	63

Introducción

Colombia es un territorio con abundantes recursos naturales debido a su variedad topográfica, a su extensión y su ubicación sobre el Ecuador terrestre; a lo largo y ancho del territorio se encuentran gran variedad de recursos naturales aprovechables, razón por la cual las poblaciones se han expandido y formado comunidades. Estas agrupaciones de personas demandan servicios básicos como suministro de agua para consumo y alcantarillado para manejo de vertimientos, haciendo que el recurso hídrico sea un limitante para la expansión de las poblaciones, razón por la cual se han establecido normas y mecanismos dirigidos a la conservación y protección de las fuentes hídricas, que son de obligatorio cumplimiento.

Tal es el caso de la región del Guavio, la cual goza de abundancia en recursos hídricos, hecho que se hace evidente para cualquier persona que recorre sus tierras, observando quebradas y ríos de pequeña, mediana y gran magnitud que propician proyectos como la hidroeléctrica del Guavio, que cuenta con un embalse de aproximadamente 950 millones de metros cúbicos de capacidad, el cual es alimentado, entre otros, por el Río Guavio, río sobre el que el casco urbano del municipio de Gachetá descarga sus aguas residuales sin tratamiento ya que no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales.

Considerando lo anterior, se establece que el tema eje de investigación es la variación de la calidad del agua de un cuerpo hídrico superficial, receptor de un vertimiento de aguas residuales doméstica. Se parte de la conceptualización de las alteraciones generadas por adición de una descarga contaminada a un cuerpo de agua superficial, así como de la recopilación de información relacionada, levantada y validada por entes territoriales, haciendo uso de los conocimientos y herramientas obtenidas en el proceso de formación como

Ingenieras Ambientales de la UNAD; y se pretende llegar a establecer el grado de afectación y justificar o no la inversión de recursos en el tratamiento de las aguas residuales.

Planteamiento del problema

La región del Guavio se caracteriza por abundancia del recurso hídrico, así como por la falta de tratamiento de las aguas residuales que generan sus centros poblados y que se descargan a los cuerpos de agua superficiales. Tal es el caso del municipio de Gachetá, que no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales PTAR en su casco urbano, por lo que entrega las aguas residuales sin tratamiento alguno, en el Río Guavio; razón por la cual el municipio podría generar contaminación en el cuerpo de agua receptor, entendiendo dicha contaminación como el cambio significativo en las concentraciones de los constituyentes del Río Guavio producto del vertimiento del casco urbano de Gachetá. Además, la falta de la PTAR ocasiona que el municipio no tenga permiso de vertimientos, por lo que CORPOGUAVIO obliga al municipio a implementar un plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV), con el propósito de unir las descargas existentes y construir la PTAR, de modo que una vez terminado el periodo de ejecución del PSMV, el municipio tramite su permiso de vertimientos.

Cabe mencionar que la falta de tratamiento en los vertimientos del casco urbano del municipio de Gachetá, así como la falta del permiso de vertimientos, podrían derivar en procesos sancionatorios, por incumplimientos de LMP (Resolución 0631 de 2015) e inexistencia de la autorización para realizar vertimientos (Decreto 1076 de 2015).

Por lo antes mencionado, se establece como pregunta de investigación:

¿Cómo determinar el impacto generado por la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio, con y sin tratamiento?

Justificación

La descarga de aguas residuales sin tratamiento e incumpliendo la norma de vertimientos puede generar afectaciones negativas al medio ambiente y a la salud humana, por el cambio significativo en la concentración de los constituyentes del cuerpo de agua receptor lo que puede derivar en pérdida de biodiversidad, generación de olores ofensivos, generación de vectores, restricción en usos del recurso hídrico e impacto paisajístico.

Además de las implicaciones ambientales y de salud humana, el manejo actual de las aguas residuales del casco urbano de Gachetá puede derivar en problemas legales por incumplimiento normativo y contaminación del medio ambiente; en este aspecto, cabe recordar que Colombia es un país con gran cantidad de normas dirigidas a la protección de los recursos naturales, muchas de las cuales fueron compiladas en el decreto único reglamentario del sector ambiente, Decreto 1076 de 2015, en el cual se definen los lineamientos para el permiso de vertimientos. Dicho decreto establece que:

“ARTÍCULO 2.2.3.3.5.1. Requerimiento de permiso de vertimiento. Toda persona natural o jurídica cuya actividad o servicio genere vertimientos a las aguas superficiales, marinas, o suelo, deberá solicitar y tramitar ante la autoridad ambiental competente, el respectivo permiso de vertimientos.” (MADS, 2015).

Es así, que la Alcaldía de Gachetá siendo una persona jurídica, con Número de Identificación Tributaria NIT: 899.999.331-2, obligada por normatividad vigente a prestar los servicios públicos y tramitar los permisos ambientales a que haya lugar, lo anterior considerando que el municipio designó como ente encargado de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo es la Empresa de Servicios Públicos SERVIGUAVIO; y considerando que en el casco urbano del municipio de Gachetá se generan vertimientos de

aguas residuales, el municipio está obligado a tramitar el permiso de vertimientos de que trata el Artículo citado.

Sin embargo, el municipio de Gachetá no tiene la capacidad de tramitar el permiso de vertimientos, toda vez que sus descargas no han sido unificadas y no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, de modo que se encuentra ejecutando un plan de saneamiento y manejo de vertimientos, en el marco del cual se cuenta con el proceso de implementación del proyecto “CONSTRUCCIÓN DE OBRAS PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO”, el cual contempla la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales del casco urbano, para lo cual el municipio adquirió el predio La Playa, ubicado en la parte baja del casco urbano (Alcaldía de Gachetá, 2019). Dicho predio se encuentra en la parte baja del perímetro urbano de Gachetá, limitando con el Río Guavio, siendo idóneo para recibir todas las descargas de aguas residuales por gravedad, evitando así sobre costos en bombeo.

Por lo tanto, es importante identificar el nivel de afectación al Río Guavio, por la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá, con el fin de establecer las implicaciones en cuanto a calidad y costos relacionadas con dicho vertimiento.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el impacto y el costo asociado a tasa retributiva por el vertimiento de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio, bajo el escenario actual y prospectivo

Objetivos específicos:

Determinar el cambio en la concentración de los parámetros fisicoquímicos pH, CONDUCTIVIDAD, OD, DQO, DBO5, SST, PT, NT, NT/PT y Grasas-Aceites, en el Río Guavio, ocasionado por la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá, bajo diferentes escenarios hidrológicos en el Río Guavio.

Determinar el cumplimiento de criterios de calidad en el cuerpo de agua receptor.

Comparar los costos asociados con tasa retributiva en los escenarios analizados.

Marco teórico

Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas aguas resultantes de un uso o aprovechamiento en una actividad doméstica o industrial, que son desechadas y cuyas condiciones de calidad iniciales han sido alteradas negativamente, por lo que no pueden ser reusadas o consumidas ya que representan riesgo para la salud humana. No todas las aguas residuales son iguales y dependen de la actividad que las genera

Según la normatividad colombiana vigente, las aguas residuales se clasifican en dos tipos, domésticas ARD y no domésticas ARnD (MADS, 2015), entendiéndose las primeras como aquellas generadas en viviendas familiares, por lo que provienen de actividades de cocina, baño y limpieza de la vivienda; mientras que las ARnD son todas las demás aguas residuales, que incluyen aguas resultantes de actividades industriales, mineras y demás actividades económicas.

Existen clasificaciones más detalladas de aguas residuales, como aguas negras, que son las provenientes del inodoro y que tienen alta carga orgánica; aguas grises, provenientes de ducha, lavamanos, cocina y lavadero; aguas residuales municipales, que pueden incluir aguas residuales de viviendas e industrias y presentan un caudal considerable; aguas residuales industriales, provenientes de procesos productivos y que pueden tener una alta carga química ya que se generan en procesos de transformación de materias primas; aguas lluvias, proveniente de escurrimientos y escorrentías a través de zonas impermeabilizadas como techos y calles, las cuales pueden estar contaminadas por arrastre de basuras mal dispuestas (Uniminuto, 2001). Sin embargo, para efectos de este trabajo de grado se considera solo la definición actual según la normatividad colombiana.

En función de su origen, se pueden establecer criterios de calidad o de contaminación de las aguas residuales, tanto en concentración de constituyentes como en características organolépticas, ya que las ARD al contener sobrantes de comida, heces fecales, grasas, aceites y tensoactivos principalmente, indica que la carga contaminante es de tipo orgánica en su mayoría; mientras que, por ejemplo, las ARnD provenientes de minería, presentan alta carga inorgánica y baja carga orgánica, debido al uso de químicos y lavado de minerales presentes en las rocas (Eco - Intellutions, 2019).

Una consideración importante para el desarrollo de este proyecto de grado, es que los municipios son de baja categoría, como el municipio de Gachetá, generalmente no incorporan actividades productivas de magnitud considerable dentro de sus cascos urbanos, ya que no cuentan con industrias o las industrias están fuera de las áreas urbanas, por lo que el sistema de alcantarillado solo recibe aguas residuales domésticas.

La generación de aguas residuales depende de la población, de modo que el municipio de Gachetá, que cuenta con una población de 4072 habitantes en su casco urbano para el 2020 según proyecciones a partir de los datos obtenidos en censos; se ubica a 1746 m.s.n.m. por lo que, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (MVCT, 2017), aplica una dotación de 130 litros por habitante cada día y un factor de retorno de 0,85; el caudal de aguas residuales de diseño o base de cálculo, generadas en el casco urbano de Gachetá es de 4,9 litros por segundo.

Vertimiento

Un vertimiento es la descarga de aguas residuales tratadas o no tratadas, a un cuerpo de agua superficial, al suelo, a sistemas de alcantarillado o al mar, realizado por una vivienda, una industria o actividad económica o un centro poblado. Cabe mencionar que un generador de

aguas residuales puede tener más de un vertimiento, situación comúnmente vista en cascos urbanos pero que también se puede presentar en viviendas familiares especialmente en zona rural, ya que pueden contar con un vertimiento para las aguas del baño y otro para el resto de la vivienda, observándose dos o más tubos o mangueras que salen de la vivienda (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Los vertimientos a un cuerpo de agua superficial pueden ser directos o indirectos, los directos se realizan mediante una tubería que llega al cuerpo de agua y que puede descargar en una de sus orillas o en el centro de este; mientras que los indirectos se generan por escorrentía de una descarga sobre un suelo impermeabilizado o saturado, por lo que el agua residual llega al cuerpo de agua por acción de la gravedad. Así mismo, los vertimientos pueden contar con estructuras para su entrega al cuerpo de agua superficial o no, conocidas como descoles y cuyo propósito es reducir el impacto físico de la descarga de agua, reduciendo proceso de socavación (Ministerio de Transporte, 2006).

Los vertimientos al suelo se pueden hacer mediante campos de infiltración o de riego, para lo cual se debe contar con un suelo con la capacidad de absorber la descarga, de lo contrario el suelo se saturaría y se realizaría una descarga indirecta a un cuerpo de agua superficial; por lo tanto, las descargas al suelo se utilizan solo para caudales reducidos, como el de una vivienda familiar en zona rural y generalmente se realiza mediante pozo de infiltración. Es importante definir la presencia de aguas freáticas cerca de la superficie, ya que un vertimiento en malas condiciones al suelo puede llegar a contraminar las aguas subterráneas (Rodríguez Pimentel, 2017).

Los vertimientos al mar suelen realizarse mediante descargas sumergidas y a una distancia considerable de las zonas de playa o de contacto primario por parte de las personas, con el fin de reducir el impacto paisajístico y la afectación negativa a la salud humana.

Finalmente, los vertimientos al alcantarillado son aquellos realizados por viviendas o actividades económicas a los sistemas de alcantarillado existentes en ciudades, cascos urbanos y centros poblados, los cuales pueden o no tener un tratamiento previo. Cabe mencionar que un vertimiento de ARnD al sistema de alcantarillado sin previo tratamiento, así como un mal uso del sistema de alcantarillado, puede generar problemas de taponamientos de las tuberías de conducción del alcantarillado, generando emergencias sanitarias (Morales, 2013).

Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales tanto domésticas como no domésticas, consiste en la implementación de una serie de procesos físicos, biológicos y químicos, con el propósito de eliminar o disminuir la concentración de elementos o sustancias contaminantes, presentes en las aguas residuales, antes de realizar su descarga o vertimiento; los mencionados procesos se realizan en unidades de tratamiento que juntas conforma un sistema de tratamiento o planta de tratamiento de aguas residuales PTAR (ACUATECNICA LTDA , 2016).

Para establecer el sistema de tratamiento a implementar, así como las unidades que lo componen es fundamental conocer el tipo, la calidad y la cantidad de las aguas residuales a tratar, ya que las ARD se caracterizan por tener alta carga orgánica pudiéndose establecer procesos de tratamiento convencionales, mientras que las ARnD requieren de unidades específicas para cada uno de los constituyentes a controlar.

Para tratar aguas residuales domésticas, de viviendas familiares en zonas rurales, es decir, que no están conectadas a sistemas de alcantarillado por lo que su manejo se debe hacer de forma individual, se suelen implementar sistemas de tratamiento mediante pozo séptico; el cual comúnmente está compuesto por trampa de grasas, cajas de inspección y

distribución, tanque séptico anaerobio, tanque filtro y pozo de infiltración, por lo que la descarga suele hacerse al suelo (Rotoplast, 2012).

En cuanto a las aguas residuales generadas en cascos urbanos, en cuyos sistemas de alcantarillado no viertan sus aguas residuales sin tratamiento las actividades económicas de tamaño considerable, se implementan tratamientos biológicos que pueden ser aerobios o anaerobios, compuestos generalmente de un pretratamiento y tratamiento primario por cribado grueso, tanque de homogenización, canal de entrada con cribado, desarenador y medidor de caudal, en el que se puede utilizar un coagulante para eliminar sólidos; luego se pasa a un tratamiento secundario compuesto por reactores aerobios o anaerobios y filtración para controlar la materia orgánica principalmente y luego se realiza el vertimiento mediante una estructura de descoles; generalmente una PTAR municipal no cuenta con tratamiento terciario como micro-filtración o desinfección. Cabe mencionar que los sistemas aerobios implican un alto costo de operación y mantenimiento debido al elevado consumo de energía y el mantenimiento de los equipos electromecánicos implementados, por lo que para una población pequeña lo más recomendable es un sistema anaerobio (Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015).

Por otro lado, el tratamiento de las aguas residuales no domésticas depende de cada actividad económica y debe tratarse incluso si el vertimiento se hace a un sistema de alcantarillado que llegue a una PTAR municipal, con el fin de impedir problemas tanto en la tubería del alcantarillado como en el funcionamiento de la PTAR municipal. Para este caso no siempre son suficientes las unidades de tratamiento convencionales por lo que se debe implementar unidades en función de los constituyentes a retirar; por ejemplo, para retirar metales o sales se puede implementar electrodiálisis y ósmosis inversa respectivamente (Caviedes Rubio, Muñoz Calderón, Perdomo Gualtero, Rodríguez Acosta, & Sandoval Rojas, 2015).

Impacto ambiental por vertimientos

El impacto ambiental derivado del vertimiento de un agua residual depende de la cantidad y la calidad del vertimiento, así como de la capacidad de asimilación del medio receptor por lo que para establecer una afectación real se deben considerar los tres aspectos mencionados.

Lo anterior desvirtúa la idea generalizada de que un vertimiento que incumple la norma de vertimientos genera siempre un impacto ambiental negativo, toda vez que hace falta considerar el caudal y así establecer la carga contaminante entregada, y así mismo, hace falta determinar la capacidad que tiene el receptor para asimilar o no la carga contaminante.

De forma paralela, el cumplimiento de la norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015, no garantiza que el medio receptor no sea afectado en cuanto al cambio considerable de la concentración de sus constituyentes, ya que un caudal elevado con una baja concentración de contaminantes se puede traducir en una alta carga contaminante, que puede exceder la capacidad de asimilación del medio receptor. En otras palabras, no es lo mismo hacer un vertimiento sin tratamiento de las aguas residuales generadas en una urbanización de cien viviendas sobre el Río Magdalena que sobre una pequeña quebrada.

En cuanto a los posibles impactos ambientales generados por vertimientos que superan la capacidad de asimilación del medio receptor y haciendo referencia especialmente a cuerpos de agua superficiales como receptores, se puede generar un deterioro en la calidad de la fuente hídrica por cambio considerable en la concentración de sus constituyentes, lo que puede impedir su uso o aprovechamiento para suministro humano debido al riesgo para la salud implícito; así mismo, se puede generar impacto paisajístico, pérdida de biodiversidad, generación de olores ofensivos, pérdida de la capacidad del cuerpo de agua para soportar vida,

acidificación del cuerpo de agua, cambio de color, crecimiento de algas, eutrofización, pérdida de espejo de agua y reducción de oferta hídrica (Arbelaez & Parra, 2017). Por otro lado, los impactos comúnmente asociados a vertimientos a suelos son encharcamientos, generación de olores ofensivos y vectores, inestabilidad del terreno, generación de procesos de remoción en masa e impacto paisajístico.

Evaluación del impacto ambiental por vertimientos

Para determinar el grado de afectación en el Río Guavio producto de la descarga de aguas residuales del casco urbano de Gachetá, es útil utilizar el índice de calidad del agua ICA, el cual es una clasificación en seis categorías que denotan la calidad del agua de un cuerpo de agua superficial, a partir de caracterizaciones de seis parámetros fisicoquímicos, como lo son oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos totales (SST), pH, demanda química de oxígeno (DQO), y conductividad eléctrica (CE) y la relación NT/PT (IDEAM, 2011).

De acuerdo con las guías del IDEAM para la determinación de parámetros, el oxígeno disuelto (OD) es la cantidad expresada en mg/L de oxígeno presente en una muestra de agua, dicho oxígeno es indispensable para las formas de vida que se encuentran en los cuerpos de agua; los sólidos suspendidos totales (SST) corresponden al peso de las sustancias presentes en una muestra de agua, que pueden ser retenidos mediante filtración y que no son volátiles a 105 °C; el pH es una medida logarítmica entre 0 y 14, de la acidez o basicidad de una muestra de agua, siendo 7 el punto neutro, 0 el extremo ácido y 14 el extremo básico; la demanda química de oxígeno (DQO) es una medición indirecta de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra de agua, ya que representa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar dicha materia orgánica, se diferencia de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), en la segunda toma como base el uso de microorganismo que degradan la materia orgánica

mediante la respiración aerobia y como regla general, la DQO es mayor que la DBO; la conductividad eléctrica (CE) es una medida indirecta de la cantidad de iones o sales presentes en una muestra de agua y muestra la facilidad con la que el agua conduce una corriente eléctrica (IDEAM, 2011).

Se deben establecer puntos de medición sobre los cuales se calcula el ICA y que sirvan de comparación entre sí, para determinar el impacto por el vertimiento, por lo que se calcula el ICA antes y después del vertimiento. En cuanto al después del vertimiento se considera la zona de mezcla, entendida como aquella longitud a la cual se ha realizado una mezcla completa de la descarga y el cuerpo de agua receptor, por lo que una muestra tomada antes de la zona de mezcla no es representativa y puede ocasionar errores de estimación (Rodríguez, 2015).

Existen gran variedad de métodos para realizar la determinación del impacto generado por una descarga de aguas residuales un cuerpo de agua superficial, con mayor o menor cantidad de variables y niveles de complejidad, entre los que se encuentran el software QUAK2K, la herramienta de modelación Water Evaluation And Planning System (WEAP) y el balance de masas; sin embargo, todos los modelos se basan en supuestos que deben ser verificados en campo, mediante mediciones reales.

En cuanto a la forma de determinar el cambio en la concentración de los parámetros de interés, a nivel nacional se cuenta con la “GUÍA NACIONAL DE MODELACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO PARA AGUAS SUPERFICIALES CONTINENTALES” emitida por el MADS en 2018, según la cual, la modelación permite describir las alteraciones que se generan en los cuerpos de agua superficiales continentales, por la descarga de aguas residuales, así como generar información para la toma de decisiones en zonas con escasa documentación (MADS, 2018). En dicha guía se presentan los lineamientos mínimos a seguir en un proceso de modelación de la calidad de las aguas superficiales continentales mediante la aplicación de un

modelo matemático, presentando los elementos que componen la modelación, el protocolo a seguir y aplicaciones de la modelación, siendo a consideración de las autoras, una guía generalizada que presenta las condiciones de aplicación de un modelo de simulación, pero no expone ejemplos o simulaciones.

Por lo que, para este caso se hace uso de la “Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua” del Perú, la cual incorpora un balance de masa como alternativa a la modelación mediante un software especializado, considerando que se analizan escenarios críticos, en los cuales los contaminantes no se degradan ni sufren transformaciones, siendo escenarios que, estando bien sustentados, podrían ser presentados ante entes de control.

Finalmente se espera que una vez entre funcionamiento la planta de tratamiento, la calidad del agua descargada deberá cumplir con los límites máximos permitidos establecidos en la Resolución 0631 de 2015, específicamente con lo definido en su Artículo 8vo. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.

Tasa retributiva

La tasa retributiva es un mecanismo implementado por autoridades ambientales para control de la contaminación, según la cual los usuarios vertedores de aguas residuales deben pagar por la carga contaminante entregada al recurso hídrico de forma directa o indirecta.

El cobro de la tasa retributiva se hace de forma anual, por lo que las autoridades ambientales determinar la carga contaminante de DBO5 y SST generada por los usuarios

vertedores, durante un año, en Kilogramos/año; la cantidad obtenida es multiplicada por un valor en pesos colombianos y se genera la facturación correspondiente.

La carga contaminante se obtiene a partir de cálculos sobre los resultados de monitoreos adelantados por un laboratorio certificado por el IDEAM, multiplicando el caudal medido por las concentraciones de DBO5 y SST.

Representatividad de los datos

El Río Guavio, siendo un cuerpo de agua superficial de tipo lóxico, tiene la característica de la autodepuración, por lo que mediante la dinámica propia de su flujo al descender, interactuando con el aire, las rocas y demás elementos del ecosistema, puede asimilar la contaminación que recibe. Por lo tanto, al tratarse de un río poco contaminado se espera que la concentración de los contaminantes vertidos decrezca (Murgén, 1984).

Para el caso de la DBO y la DQO, siendo parámetros no conservativos, es decir que reaccionan consumiendo el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, se espera que la concentración decrezca siendo asimilada por el río, y teniendo como principal efecto que la concentración de oxígeno disuelto en el río se vea reducida. Sin embargo, para que dichas reacciones tengan lugar se deben considerar las variables de tiempo y distancias como mínimo, ya que las reacciones no son instantáneas; y como primera consideración, se tiene como punto de partida la zona de mezcla, después de la cual se encuentran las máximas concentraciones de los constituyentes tras realizar un vertimiento (ANA, 2017).

En cuanto a los datos obtenidos, las zonas de mezcla obtenidas variando el punto de la descarga de un lado al centro del río son 325 metros y 81 metros respectivamente, por lo que con una velocidad promedio del río de 0,42 m/s (CORPOGUAVIO, 2018), el tiempo transcurrido desde la descarga hasta la zona de mezcla varía entre 13 y 3,2 minutos, siendo un tiempo muy corto tendiendo como referencia que el ensayo de la DBO5 tarda cinco días. Por lo tanto, se

considera que el análisis mediante balance de masas es representativo, mostrando datos relevantes para la toma de decisiones.

Caso de estudio

El municipio de Gachetá se encuentra ubicado al este del departamento de Cundinamarca, a aproximadamente 80 kilómetros de la capital Bogotá, desde la cual se llega tomando la vía La Calera-Guasca y atravesando la RFPN Páramo Grande.

Actualmente, el casco urbano del municipio de Gachetá cuenta con una población de 4072 habitantes según datos obtenidos del DANE, población que genera aguas residuales de forma constante. Dichas aguas residuales son descargadas sin tratamiento al Río Guavio en tres puntos de vertimientos conocidos como Paintball, Polideportivo y Hospital. En la Figura 1: Vertimientos, se muestran las localizaciones de las mencionadas descargas de aguas residuales.

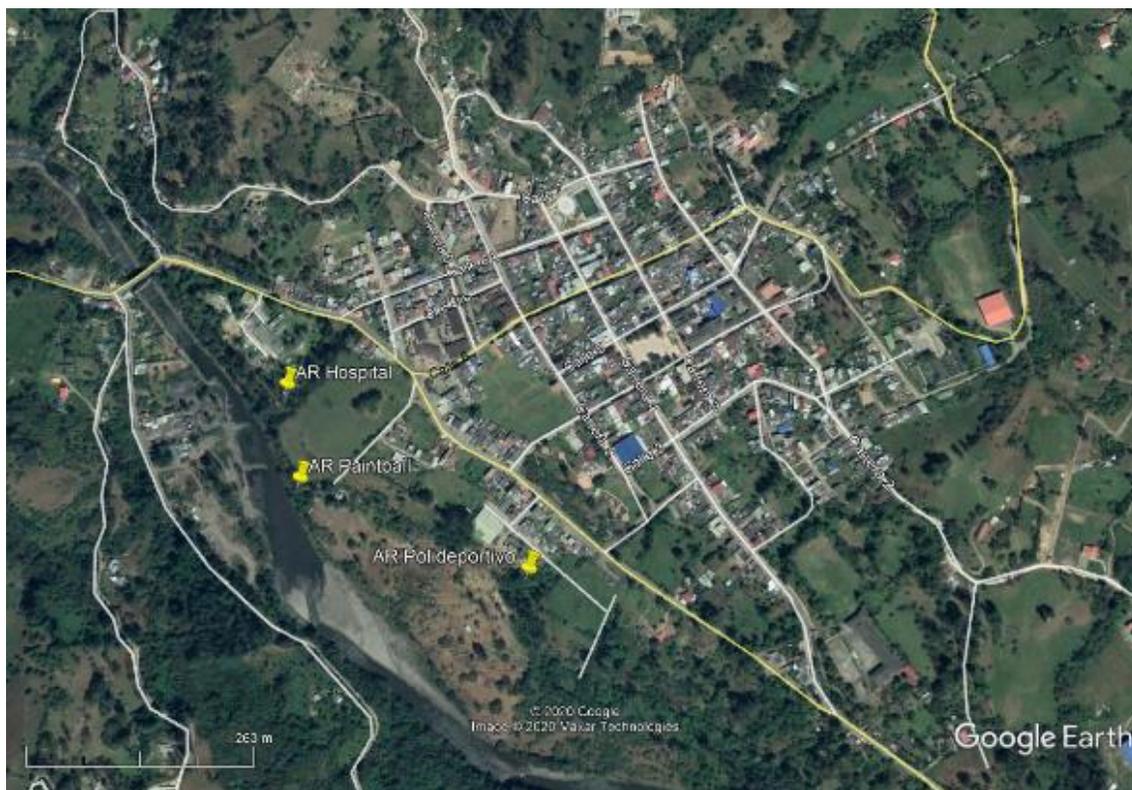


Figura 1: Vertimientos. Fuente: Google Earth

En cuanto al tipo de aguas residuales que entrega el casco urbano de Gachetá al Río Guavio, se conoce que dentro del perímetro urbano no se encuentran industrias como mataderos, curtiembres, cemento, acero, cervecerías ni productos lácteos de magnitud considerable, que aporten aguas residuales no domésticas al sistema de alcantarillado y que deban ser tratadas previamente, por lo que se parte de que la totalidad de las aguas residuales a tratar y disponer corresponde a aguas residuales domésticas.

Cabe anotar que, si bien el municipio de Gachetá cuenta con matadero municipal, dicho matadero se encuentra fuera del perímetro urbano, en la vereda Resguardo II, cuenta con su propia planta de tratamiento de aguas residuales y realiza vertimiento aguas arriba del casco urbano del municipio de Gachetá. En la Figura 2: Localización del matadero municipal, se muestra la localización del matadero municipal respecto al casco urbano del municipio de Gachetá.

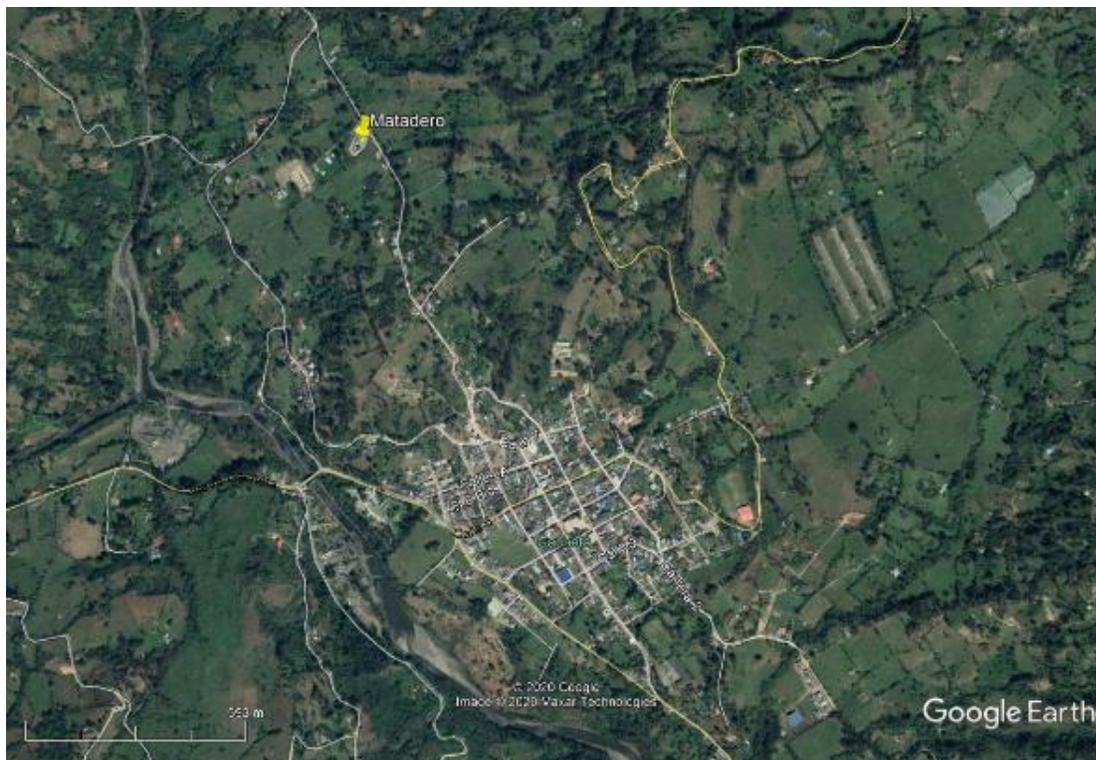


Figura 2: Localización del matadero municipal. Fuente: Google Earth

Para atender la problemática en torno a la descarga de aguas residuales sin tratamiento, el municipio de Gachetá elaboró un plan de saneamiento y manejo de vertimientos PSMV, dicho plan fue aprobado por CORPOGUAVIO y que tiene como propósitos unir las tres descargas generando un solo vertimiento y posteriormente construir una planta de tratamiento de aguas residuales. En la Figura 3: Predio PTAR y recorrido, se muestra el predio al cual se llevarán las aguas residuales una vez sea implementado el plan maestro de alcantarillado que contempla el PSMV, así mismo, se muestra el recorrido realizado en marzo de 2020 por las autoras, mediante una línea roja.

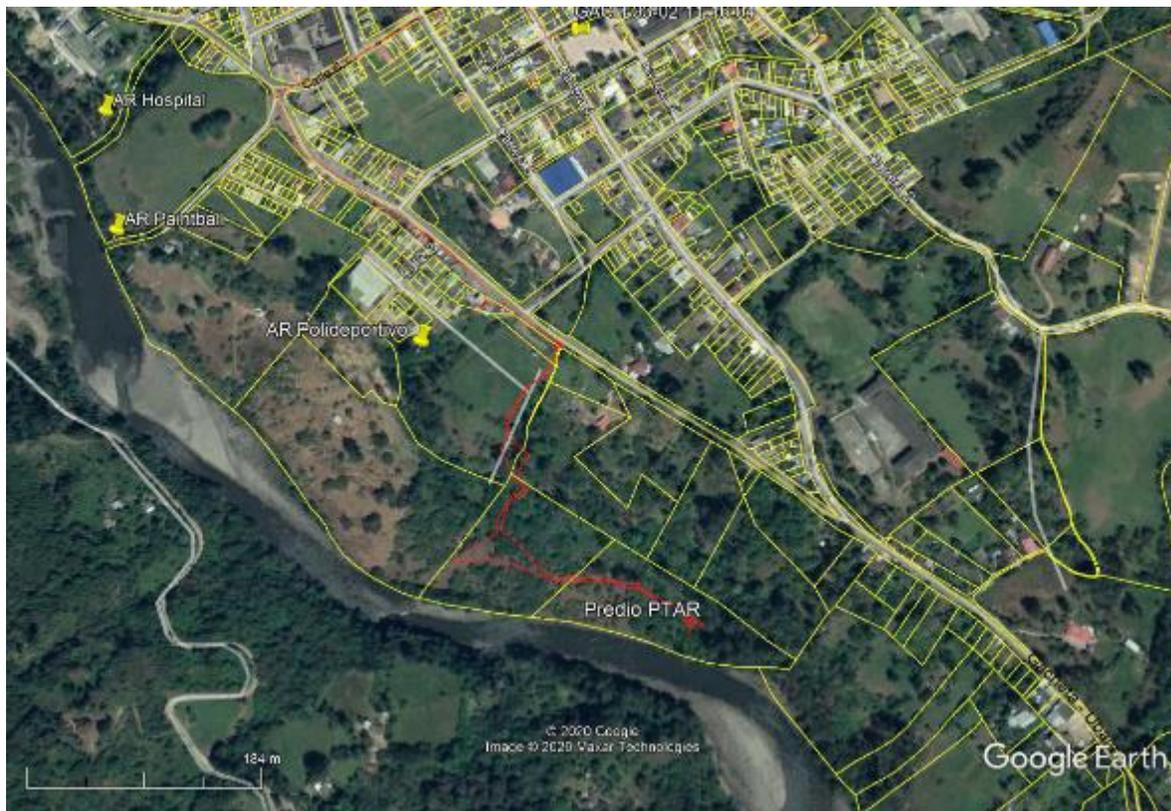


Figura 3: Predio PTAR y recorrido. Fuente: Google Earth

La PTAR que se tiene prevista para el casco urbano de Gachetá es de tipo anaerobio, contempla tratamiento primario con cribado y desarenadores, tratamiento secundario con reactores anaerobios de flujo ascendente y filtros anaerobios de flujo ascendente, así como

manejo de lodos mediante lechos de secado; la PTAR no contempla tratamiento terciario, lo que se puede deber a que las aguas residuales a tratar corresponden a domésticas. En la Figura 4: Esquema de localización de la PTAR, se muestra el esquema de la PTAR en el predio establecido para su construcción.



Figura 4: Esquema de localización de la PTAR. Fuente: Google Earth

Una vez las aguas sean tratadas, se descargarán al Río Guavio, el cual tributa al cuerpo de agua lenticó Embalse del Guavio, 9 kilómetros más adelante de la descarga unificada del casco urbano de Gachetá. En la Figura 5: Imagen satelital Gachetá y Embalse del Guavio, se muestra la localización del embalse del Guavio respecto a Gachetá.

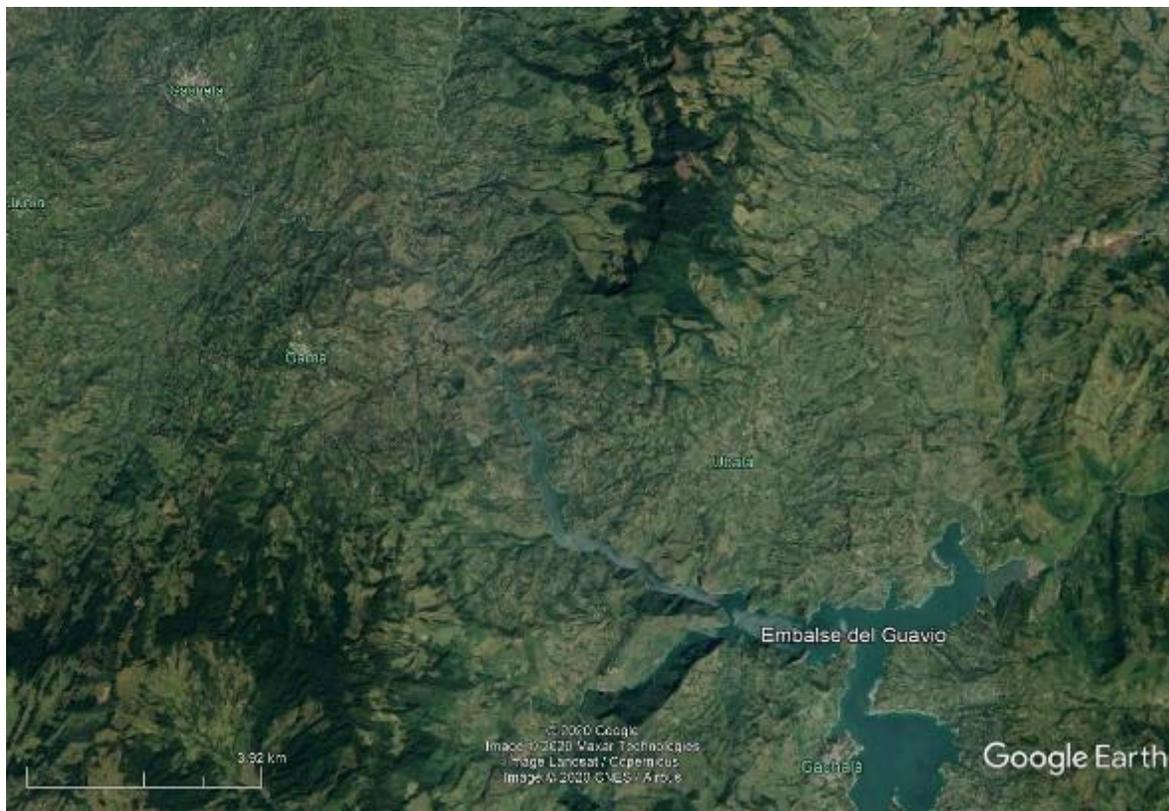


Figura 5: Imagen satelital Gachetá y Embalse del Guavio. Fuente: Google Earth

En cuanto al Río Guavio, dicho cuerpo de agua cuenta con objetivos de calidad establecidos mediante Resolución 863 de 2017 (Corporación Autónoma Regional del Guavio, 2012), según los cuales se establecen límites en las concentraciones de los constituyentes presentes en el río, que pueden limitar las descargas que se realicen al mismo toda vez que sobrepasarían la capacidad de asimilación del río haciendo que se generara incumplimiento de los mencionados objetivos de calidad, lo que implicaría contaminación del cuerpo de agua.

Para hacer seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad, CORPOGUAVIO realiza monitoreos anuales al Río Guavio, tanto en época de lluvias como de estiaje, mediante la contratación de laboratorios acreditados por el IDEAM para el análisis de las muestras; además, la autoridad ambiental realiza monitoreos a las descargas de aguas residuales del casco urbano de Gachetá. Los monitoreos mencionados son públicos, pudiendo ser

consultados en la página web de CORPOGUAVIO, siendo de utilidad para el desarrollo de esta propuesta de grado. En la Figura 6: Puntos de monitoreo, se presenta la localización de los puntos en los que se tienen datos de calidad y cantidad.

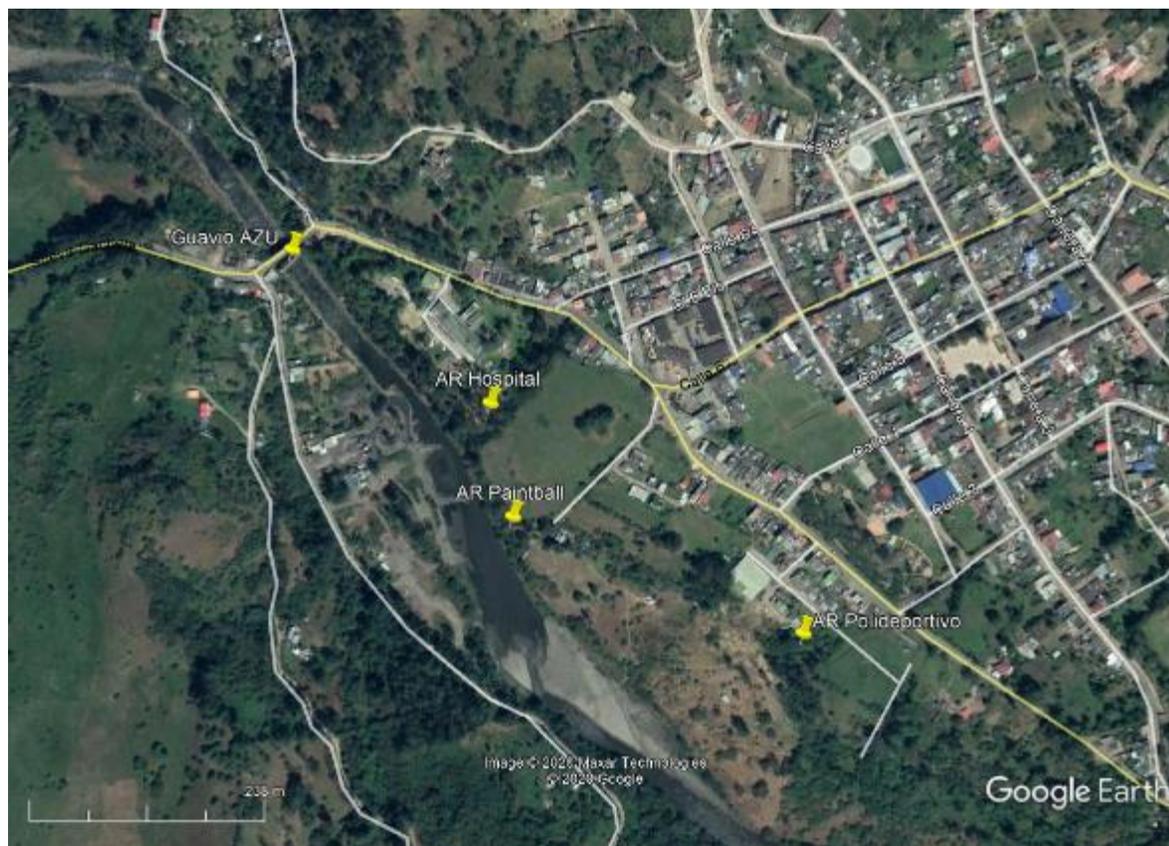


Figura 6: Puntos de monitoreo. Fuente: Google Earth

En cuanto a los monitoreos, a continuación, en la Tabla 1: Concentraciones Río Guavio y Vertimientos, se presentan los resultados de las caracterizaciones adelantadas por CORPOGUAVIO, en los cuatro puntos de toma de muestras relacionados en la Figura 6: Puntos de monitoreo

Tabla 1: Concentraciones Río Guavio y Vertimientos

ESTIAJE					
Parámetro	Unidad	RÍO ANTES	Paintball	Polideportivo	Hospital
Q	L/s	949,2	1,1	0,3	0,5
pH		8,0	7,7	7,6	8,2
Conductividad	µS/cm	220,0	244,3	261,7	194,3
% O2	%	73,4	43,3	39,4	41,0
DQO	mg O2 /L	10,0	493,0	129,4	510,9
DB05	mg O2 /L	2,1	298,5	32,8	159,0
SST	mg/L	283,0	245,0	65,0	82,9
NT	mg N/L	0,5	52,3	12,7	74,7
PT	mg P /L	0,1	11,0	1,6	7,9
NT/PT		5,0	4,8	7,9	9,5
Grasas y aceites	mg/L	4,0	86,5	28,0	36,5
LLUVIA					
Parámetro	Unidad	RÍO ANTES	Paintball	Polideportivo	Hospital
Q	L/s	978,8	5,9	0,3	0,5

pH		7,5	6,8	7,6	8,2
Conductividad	μS/cm	50,0	1021,7	603,3	701,7
% O2	%	85,8	27,1	51,7	0,1
DQO	mg O2 /L	10,0	694,6	129,4	510,9
DB05	mg O2 /L	2,1	307,0	32,8	159,0
SST	mg/L	63,0	146,4	65,0	82,9
NT	mg N/L	0,5	47,4	12,7	74,7
PT	mg P /L	0,1	5,8	1,6	7,9
NT/PT		5,0	8,2	7,9	9,5
Grasas y aceites	mg/L	4,0	128,0	28,0	36,5

La información presentada anteriormente puede ser utilizada para prever condiciones futuras o críticas, pudiéndose determinar condiciones para evaluar grados de afectación al cuerpo de agua receptor mediante diferentes variaciones de las condiciones actuales, de modo que, se pueden establecer escenarios con variaciones tanto del río como del vertimiento y analizar el cambio en la concentración de los constituyentes y sus implicaciones en calidad y en costos.

Metodología

Para el desarrollo del proyecto se tomó como referencia la “Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua”, de la Autoridad Nacional del Agua ANA y del Ministerio de Agricultura y Riego del Perú; la cual se utilizó para establecer el cambio en la concentración de ciertos parámetros en el Río Guavio, debido a la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá. Se aclara que tanto la metodología como la presentación de resultados responden al orden indicado en la mencionada guía, con sus respectivas adecuaciones al proyecto de qué trata esta opción de grado.

En cuanto a la conservación de la masa, considerando que tanto la DBO como la DQO no son conservativos, es decir, que reaccionan con el oxígeno presente en el cuerpo de agua una vez se hace el vertimiento, se aclara que la metodología mediante balance de masas utilizada en este trabajo de grado es representativa toda vez que, para que las reacciones tengan lugar se deben considerar las variables de tiempo y distancias como mínimo, ya que las reacciones no son instantáneas; y como primera consideración, se tiene como punto de partida la zona de mezcla, después de la cual se encuentran las máximas concentraciones de los constituyentes tras realizar un vertimiento (ANA, 2017). Además, las zonas de mezcla obtenidas variando el punto de la descarga de un lado al centro del río son 325 metros y 81 metros respectivamente, las cuales son distancias cortas, por lo que con una velocidad promedio del río de 0,42 m/s (CORPOGUAVIO, 2018), el tiempo transcurrido desde la descarga hasta la zona de mezcla varía entre 13 y 3,2 minutos, siendo un tiempo muy corto tendiendo como referencia que el ensayo de la DBO5 tarda cinco días.

Así mismo, se aclara que, para determinar la amplitud de las reacciones, mostrando el comportamiento de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor, se debe hacer un modelo

de calidad del agua, sin embargo, no se cuenta con información de calidad siguiendo una misma masa de agua, sino únicamente de datos puntuales en diferentes momentos del tiempo, razón por la cual este proyecto de grado no trata sobre la modelación de los contaminantes en el Río Guavio tras la descarga, sino de la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio.

Por otro lado, en este trabajo de grado se fue más allá de la guía, estableciendo escenarios con y sin tratamiento, en la actualidad usando datos de monitoreos y en un periodo de diseño de 25 años, con el fin de analizar sus implicaciones tanto a nivel de calidad como de costos, además, se calculó y comparó el cumplimiento de criterios de calidad en el cuerpo de agua receptor y los costos asociados con tasa retributiva en los ocho escenarios. A continuación, se presentan los escenarios establecidos

Tabla 2: Escenarios

NÚMERO	ESCENARIO
1	Descarga de ARD sin tratamiento en época de estiaje
2	Descarga de ARD con tratamiento en época de estiaje
3	Descarga de ARD sin tratamiento en época de lluvia
4	Descarga de ARD con tratamiento en época de lluvia
5	Descarga de ARD sin tratamiento en época de estiaje 2045
6	Descarga de ARD con tratamiento en época de estiaje 2045

7	Descarga de ARD sin tratamiento en época de lluvia 2045
8	Descarga de ARD con tratamiento en época de lluvia 2045

Para determinar el cambio en la concentración de los parámetros fisicoquímicos pH, CONDUCTIVIDAD, OD, DQO, DBO5, SST, PT, NT, NT/PT y Grasas-Aceites, en el Río Guavio, ocasionado por la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá, con y sin tratamiento, en la actualidad y en 25 años y calcular y comparar el cumplimiento de criterios de calidad en el cuerpo de agua receptor y los costos asociados con tasa retributiva en los ocho escenarios, se siguió la metodología propuesta en la guía mencionada, la cual consta de las siguientes partes:

Características del agua residual

Se establecieron los parámetros a considerar en función de las condiciones del proyecto y la normatividad vigente, por lo que se consultó la Resolución 0631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” en su Artículo 8 “Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas - ARD de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales.” Para lo anterior fue necesario establecer la carga contaminante de DBO5 aportada por el municipio de Gachetá, con el ánimo de identificar los límites aplicables, por lo

que se utilizó la ecuación (1), obtenida de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2015):

$$Cc = Q * DBO5 * 0,0864 \quad (1)$$

Dónde:

Cc: Carga contaminante de DBO5 en Kg/día

Q: Caudal en L/s

DBO5: Concentración de DBO5 en mg/L

Además, con el ánimo de identificar el cambio en la calidad del agua del cuerpo de agua receptor, se consultó la metodología del IDEAM para determinar el Índice de Calidad Ambiental ICA, que tiene ecuaciones para 5, 6 y 7 variables, optándose por la opción de 6 variables debido a la información disponible, ya que los datos eran insuficientes para determinar el ICA mediante 7 variables.

Finalmente, para poder evaluar y comparar costos asociados con la descarga, se revisó el procedimiento para cálculo de la tasa retributiva establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el Capítulo 7 del decreto único reglamentario del sector ambiente Decreto 1076 de 2015

Determinación de concentraciones

Para las condiciones actuales sin tratamiento en época de lluvia y de estiaje, se obtuvo información de calidad y cantidad a partir de monitoreos realizados por CORPOGUAVIO que están publicados en su página web. Cabe mencionar que la autoridad ambiental mencionada, contrata laboratorios acreditados por el IDEAM para la determinación de la calidad del agua, quienes de acuerdo con los informes publicados por la entidad ambiental utilizan oxímetros

para determinar el oxígeno disuelto, y ejecutan los métodos de medición SM 5210-B, SM4500 O, G y SM 5220 D para determinar DBO5 Y DQO, respectivamente.

Considerando que existen tres descargas, que las tres se encuentran relativamente cerca y que tanto en el plan maestro de alcantarillado como el plan de saneamiento y manejo de vertimientos se tiene planeada la construcción de un interceptor que unifique las descargas, fue necesario ponderar las concentraciones y sumar sus caudales, estableciendo valores para una sola descarga, utilizando la ecuación (2) obtenida de la guía peruana de referencia (ANA, 2017):

$$C_p = \frac{\sum Q_i * C_i}{\sum Q_i} \quad (2)$$

Dónde:

C_p: Concentración ponderada de los vertimientos

Q_i: Caudal de cada vertimiento

C_i: Concentración de cada vertimiento

Posteriormente se determinaron concentraciones con tratamiento, a partir de remociones teóricas encontradas en bibliografía (Romero Rojas, 2005), en función del tipo de tratamiento y las unidades de tratamiento contempladas, así como del obligatorio cumplimiento de la norma de vertimientos. Por lo tanto, a partir de las concentraciones actuales medidas en las descargas y conociendo los porcentajes de remoción de las unidades de tratamiento previstas, se determinaron las concentraciones teóricas después de realizar tratamiento, utilizando la ecuación (3) obtenida de (Romero Rojas, 2005).

$$C_t = C - (C * \%R) \quad (3)$$

Dónde:

Ct: Concentración después del tratamiento

C: Concentración del parámetro medida

%R: Porcentaje de remoción después del tratamiento

Datos prospectivos

Hasta este punto, se habían contemplado cuatro escenarios: estiaje sin tratamiento, estiaje con tratamiento, lluvia sin tratamiento y lluvia con tratamiento, a partir de los datos encontrados en los monitoreos, haciendo falta los escenarios futuros con caudales máximos.

Continuado, considerando un periodo de diseño de 25 años, el cual está establecido en la Resolución 0330 de 2017, se procedió a determinar el caudal máximo de tratamiento en el periodo de diseño, para lo cual se buscaron datos de población en los censos del DANE y se proyectó la población utilizando el método geométrico, el cual asume que el crecimiento de la población es proporcional al tamaño de la misma, es aplicable a todos los niveles de complejidad del sistema y presenta la ecuación 4 (Tutoriales al día-Ingeniería Civil, 2020):

$$Pf = Pa * (1 + r)^t \quad (4)$$

Dónde:

Pf: Población futura

Pa: Población actual

r: rata de crecimiento

t: periodo de cálculo en años

Para calcular el caudal máximo de descarga de aguas residuales, se utilizó la ecuación (5), la cual considera la dotación indicada en el RAS, factor de retorno, coeficiente multiplicador y la población (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2017)

$$QMH = \frac{Pf * Dot * \%ret * FMH}{86400} \quad (5)$$

Dónde:

QMH: Caudal máximo horario

Pf: Población futura

%ret: coeficiente de retorno

FMH: factor multiplicador del caudal

Con el caudal máximo establecido se procedió a establecer los escenarios futuros, considerando la población futura y el caudal máximo generado por esa población

Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor

Se utilizó información obtenida de monitoreos realizados por CORPOGUAVIO, en los cuales se levantaron perfiles transversales del Río Guavio. Los perfiles se dividen en secciones y se mide velocidad de cada una, para luego multiplicarla por el área de cada sección y obtener caudales parciales. El caudal del río es la sumatoria de los caudales parciales

Determinación de la zona de mezcla

Para determinar la zona de mezcla, se calculó primero la velocidad de corte (u^*) en metros por segundo y el coeficiente de dispersión (Dy), mediante las ecuaciones (6) y (7), obtenidas de la guía de los peruanos (ANA, 2017).

$$u^* = \sqrt{g * d * s} \quad (6)$$

$$Dy = c * d * u^* \quad (7)$$

Dónde:

u^* : Velocidad de corte

g: Gravedad

d: Profundidad media del río aguas abajo

s: pendiente del río

Dy: Coeficiente de dispersión

c: Factor de irregularidad del cauce

La zona de mezcla para vertimiento en la orilla del río se calculó con la ecuación (8) (ANA, 2017):

$$LZdM = \frac{Wmin^2 * u}{2 * \pi * Dy} \quad (8)$$

Dónde:

LZdM: Zona de mezcla

Wmin: Ancho medio del cuerpo de agua abajo del vertimiento

u: Velocidad de flujo medio

Dy: Coeficiente de dispersión

Finalmente, considerando vertimiento en el centro del río o quebrada, la longitud de la zona de mezcla se calcula con la ecuación (9) (ANA, 2017):

$$LZdM = \frac{Wmin^2 * u}{8 * \pi * Dy} \quad (9)$$

Determinación del caudal disponible para la dilución

Partiendo del caudal medido, se aplicó un factor de seguridad de 2, con el fin de tener en cuenta la variación multianual de los caudales en época de estiaje y garantizar condiciones críticas en la evaluación.

El caudal crítico (Q_{cri}) se calculó utilizando la ecuación (10) (ANA, 2017):

$$Q_{cri} = \frac{Q}{2} \quad (10)$$

Dónde:

Q_{cri} : Caudal crítico

Q : Caudal del río

Balance de masas

Se realizó balance de masas para los distintos escenarios, teniendo como escenario crítico “estiaje sin tratamiento y caudal máximo de vertimientos” ya que el cuerpo de agua receptor presenta el menor caudal mientras que la carga contaminante es la máxima.

El balance de masas permitió identificar el impacto ambiental entendido como el cambio en la concentración de los constituyente o parámetros del cuerpo de agua receptor, debido a la descarga de las aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá, en ocho escenarios, bajo la consideración de que dichos constituyentes no reaccionan ni se degradan

por la acción auto depuradora del Río Guavio, lo que constituye una condición crítica, por lo que los escenarios evaluados utilizan dantos extremo o sobredimensionados.

Para hacer el balance de masas se utilizó la ecuación (11) obtenida de (ANA, 2017):

$$C_d = \frac{C_r * Q_r + C_v * Q_v}{Q_r + Q_v} \quad (11)$$

Dónde:

Cd: Concentración calculada en el límite de la zona de mezcla aguas abajo del vertimiento

Cr: Concentración en el cuerpo receptor

Cv: Concentración en el vertimiento

Qv: Caudal del vertimiento

Qr: Caudal crítico del río

Cálculo de ICA

Para calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA) del cuerpo de agua receptor, se utilizó la metodología del IDEAM para seis parámetros. En la Tabla 3: variables y ponderaciones para ICA de 6 parámetros, se muestran los constituyentes tenidos en cuenta para el cálculo del ICA, así como su ponderación o peso dentro del cálculo,

Tabla 3: variables y ponderaciones para ICA de 6 parámetros

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0,17

Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/L	0,17
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/L	0,17
NT/PT		0,17
Conductividad eléctrica, C.E.	μS/cm	0,17
pH	Unidades de pH	0,15

Cada variable es calculada mediante ecuaciones cuyo resultado va desde 0 hasta 1, para luego ser multiplicada por el valor de la ponderación y finalmente ser sumadas para establecer el ICA. La ponderación de los parámetros establecida por el IDEAM indica el peso que cada parámetro tiene dentro del cálculo del ICA, siendo el pH el único inferior y por lo tanto, el que menor representatividad tiene dentro del cálculo del ICA (IDEAM, 2011)

Cálculo de tasa retributiva

La tasa retributiva se calculó de conformidad con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015, para lo cual se determinó la carga contaminante, en kilogramos, descargada al cuerpo de agua receptor en los ocho escenarios, durante un periodo de un año y posteriormente se multiplico por el costo de cada kilogramo.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció la tarifa mínima para tasa retributiva por vertimientos puntuales del agua del 2020, considerando los parámetros de DBO5

y SST. De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076, la tasa retributiva se puede calcular mediante la ecuación (12) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2015):

$$TR = Cv * Qv * FR * t * \$DBO5 \quad (12)$$

Dónde:

TR: tasa retributiva

Cv: Concentración en el vertimiento

Qv: Caudal del vertimiento

FR: Factor regional, 1 para el caso

t: Tiempo de evaluación

\$DBO5: costo en pesos de cada kilogramo de DBO5, se cambia por \$SST para calcular el valor la tasa por sólidos.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados y la discusión de los mismos, siguiendo el orden establecido en la guía de referencia, se aclara que el orden tanto de los resultados como de la metodología responde a la guía de los peruanos.

Características del agua

El Artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015 establece que se deben monitorear los parámetros mostrados en la Tabla 6: Parámetros y LMP, dicha tabla también establece los límites máximos permisibles. Sin embargo, dicha norma presenta rangos en función de la carga de DBO5, por lo que fue necesario calcular la carga contaminante de DBO5 en los vertimientos de Gachetá, a partir de la

Tabla 1: Concentraciones Río Guavio y Vertimientos.

Tabla 4: Carga contaminante de DBO5 en estiaje

EN ESTIAJE	PAINTBALL	POLIDEPORTIVO	HOSPITAL	SUMA
Q (L/s)	1,1	0,3	0,5	1,9
DBO5 (mg/L)	493,0	129,4	510,9	
Cc (Kg/día)	47,3	3,8	20,5	71,6

Tabla 5: Carga contaminante de DBO5 en lluvias

EN LLUVIA	PAINTBALL	POLIDEPORTIVO	HOSPITAL	SUMA
Q (L/s)	5,9	0,3	0,5	6,7
DBO5 (mg/L)	307,0	32,8	159,0	

Cc (Kg/día)	156,9	1,0	6,4	164,2
-------------	-------	-----	-----	-------

De la Tabla 4: Carga contaminante de DBO5 en estiaje y la Tabla 5: Carga contaminante de DBO5 en lluvias, se establece que la máxima carga contaminante entregada por el municipio de Gachetá es de 164,2 Kg/día, por lo tanto los límites máximos permisibles para su vertimiento son los que se presentan en la Tabla 6: Parámetros y LMP.

Tabla 6: Parámetros y LMP

PARÁMETROS	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS - ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD - ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 kg/día DBO5
Generales		
pH	Unidades de pH	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	180

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	90
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo		
Ortofosfatos (P-PO4 3-)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte

La relativamente baja carga contaminante encontrada responde a las condiciones propias del municipio de Gachetá, con una población de menos de 5000 habitantes en su casco urbano, cuyas aguas residuales se generan en baños, cocinas y durante labores de aseo; así mismo, está ligada a la no presencia de industrias alimenticias de tamaño considerable dentro del casco urbano de Gachetá.

De las tres descargas existentes, solo se aprecia una alta variabilidad de caudal en época de lluvia para PAINTBALL, aumentando su caudal en más de cinco veces, lo que puede asociarse a una alta infiltración de aguas lluvias en la red de alcantarillado que vierte en el punto denominado PAINTBALL y una buena separación de aguas en las redes que descargan en POLIDEPORTIVO y HOSPITAL.

Al comparar el cambio en el caudal con el cambio en la concentración, se hace evidente que no tiene una relación lineal, es decir que el aumento del caudal no implica un aumento de la concentración, sino que, tal como se observa en los datos, la concentración de la DBO5 disminuye cuando se mide en época de lluvia, lo cual se debe a que el agua lluvia diluye la concentración del parámetro mencionado (SYSCOL Consultores SAS, 2019).

Lo anterior no tiene alcance a los datos de carga contaminante, ya que en teoría deberían ser iguales las cargas contaminantes generadas en viviendas tanto en época de lluvia como de estiaje, ya que al aumentar el caudal la concentración disminuye y el producto de los dos, en ambas condiciones, se mantiene, es decir la carga contaminante es la misma; por lo que el aumento en la carga contaminante en época de lluvia en las descargas monitoreadas, se puede deber a arrastres de sólidos y materia orgánica por acción de la lluvia.

Determinación de concentraciones

Una vez revisados los INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE CUERPOS HÍDRICOS del municipio de Gachetá en épocas de lluvia y estiaje, para el 2019, se encontraron los datos presentados en la

Tabla 1: Concentraciones Río Guavio y Vertimientos.

Por otro lado, en la Tabla 7: Concentraciones ponderadas y con tratamiento, se muestran los valores de las tres descargas unificadas con y sin tratamiento, en época de lluvia y época de estiaje

Tabla 7: Concentraciones ponderadas y con tratamiento

ESTIAJE				
Parámetro	Unidad	RÍO ANTES	Ponderado	Tratado
Q	L/s	949,2	1,9	1,9
pH		8,0	7,8	7,8
Conductividad	µS/cm	220,0	235,3	235,3
% O ₂	%	73,4	42,0	42,0
DQO	mg O ₂ /L	10,0	432,8	126,6
DB05	mg O ₂ /L	2,1	217,5	58,3
SST	mg/L	283,0	173,7	57,7
NT	mg N/L	0,5	50,7	50,7

PT	mg P /L	0,1	8,6	5,6
NT/PT		5,0	6,5	6,5
Grasas y aceites	mg/L	4,0	64,0	20,0
LLUVIA				
Parámetro	Unidad	RÍO ANTES	Ponderado	Tratado
Q	L/s	978,8	6,7	6,7
pH		7,5	7,3	7,3
Conductividad	µS/cm	50,0	869,7	869,7
% O2	%	85,8	24,9	24,9
DQO	mg O2 /L	10,0	549,6	160,8
DB05	mg O2 /L	2,1	222,4	59,6
SST	mg/L	63,0	116,5	38,7
NT	mg N/L	0,5	47,8	47,8
PT	mg P /L	0,1	5,6	3,6
NT/PT		5,0	8,4	8,4
Grasas y aceites	mg/L	4,0	88,0	20,0

Al observar la Tabla 7: Concentraciones ponderadas y con tratamiento, se hace evidente el incumplimiento actual de la norma de vertimientos, por parte del municipio de

Gachetá, ya que tanto en DBO5 como en DQO y SST las concentraciones medidas superan el límite máximo establecido en la norma de vertimientos, lo cual puede derivar en procesos sancionatorios por parte de la autoridad ambiental, debido a la posible afectación negativa al cuerpo de agua receptor Río Guavio.

Así mismo, en la mencionada tabla, se aprecia la notable reducción en las concentraciones de los parámetros en el vertimiento, de llegarse a implementar una planta de tratamiento de aguas residuales, lográndose el cumplimiento de la norma de vertimientos.

Cabe mencionar que la norma de vertimientos solo hace referencia a la concentración de los parámetros, es decir a la calidad del vertimiento, pero no considera el caudal y por tanto no tiene en cuenta la carga contaminante como un límite máximo permisible, siendo algo fundamental a nuestro parecer ya que podría brindar un límite más acertado siempre y cuando las cargas se establezcan en función de la capacidad del cuerpo de agua receptor.

Datos prospectivos

Para poder hacer un análisis de las implicaciones futuras de los escenarios prospectivos, se calcularon datos de población y caudal en un periodo de diseño de 25 años, tal como se muestra a continuación

En la Tabla 8: Población censada y proyectada, se muestran los datos obtenidos al consultar los censos de 1938, 1951, 1964, 1973, 1985, 1993 y 2005, así como las poblaciones proyectadas para 2020 y 2045, respondiendo al periodo de diseño establecido.

Tabla 8: Población censada y proyectada

AÑO	Gachetá
------------	----------------

	COD:25297	
	POB URB.	POB RUR.
	(Hab)	(Hab)
1938	1.065	13.990
1951	1.318	14.300
1964	2.195	13.911
1973	2.770	12.626
1985	3.345	11.341
1993	2.947	5.592
2005	3.186	7.013
2020	4.072	6.008
2045	6.129	4.644
NC	MEDIO	
RATAS:	1,65	-1,03

En la Tabla 9: Caudales proyectados se presentan los caudales obtenidos en el periodo de diseño.

Tabla 9: Caudales proyectados

PTAR CASCO URBANO GACHETÁ					
AÑO	Tf	Pf	DOTACIÓN	COEFICIENTE DE	CAUDAL MÁXIMO
			NETA	RETORNO	HORARIO (QMH)
			(l/hab*día)	(%)	(l/s)
0	2020	4.072	130	85%	20,830
1	2021	4.139	130	85%	21,174
2	2022	4.207	130	85%	21,523
3	2023	4.277	130	85%	21,878
4	2024	4.347	130	85%	22,239
5	2025	4.419	130	85%	22,605
6	2026	4.492	130	85%	22,978
7	2027	4.566	130	85%	23,357
8	2028	4.641	130	85%	23,742
9	2029	4.718	130	85%	24,134
10	2030	4.795	130	85%	24,532
11	2031	4.874	130	85%	24,936
12	2032	4.955	130	85%	25,347

PTAR CASCO URBANO GACHETÁ					
AÑO	Tf	Pf	DOTACIÓN	COEFICIENTE DE	CAUDAL MÁXIMO
			NETA	RETORNO	HORARIO (QMH)
			(l/hab*día)	(%)	(l/s)
13	2033	5.036	130	85%	25,765
14	2034	5.120	130	85%	26,190
15	2035	5.204	130	85%	26,622
16	2036	5.290	130	85%	27,061
17	2037	5.377	130	85%	27,507
18	2038	5.466	130	85%	27,961
19	2039	5.556	130	85%	28,422
20	2040	5.647	130	85%	28,891
21	2041	5.741	130	85%	29,367
22	2042	5.835	130	85%	29,851
23	2043	5.931	130	85%	30,343
24	2044	6.029	130	85%	30,844
25	2045	6.129	130	85%	31,352

De acuerdo con los datos obtenidos se espera que, en los próximos 25 años, que es el periodo de diseño establecido atendiendo a la normatividad técnica vigente, la población del casco urbano de Gachetá aumente en poco más del 50%, pasando de 4072 habitantes en 2020 a los 6129 habitantes en 2045. Cabe recordar que las proyecciones de población se realizaron utilizando el método geométrico, el cual asume que el crecimiento de la población es proporcional al tamaño de esta y es aplicable a todos los niveles de complejidad del sistema.

Determinar la población futura sirvió para calcular el caudal máximo de aguas residuales que generará el casco urbano del municipio de Gachetá en el periodo de diseños de 25 años y a partir del cual deben estar diseñadas algunas unidades de tratamiento; dicho caudal también sirve para establecer el dato de máxima generación de carga contaminante que podría entregar el casco urbano de Gachetá al Río Guavio, pudiéndose realizar estimaciones de impactos negativos sobre el cuerpo de agua receptor

El caudal máximo calculado, de generación de aguas residuales de origen doméstico asciende a 31,3 L/s, considerando una dotación de 130 L/hab*día ya que el casco urbano de Gachetá se encuentra entre los 1000 y 2000 metros sobre el nivel del mar; el coeficiente de retorno de las aguas consumidas que se convierten en aguas residuales es del 85%, por lo que se considera que el 15% restante es consumido en preparación de alimentos o se pierde durante el aseo por evaporación.

Si bien el aumento en la generación de caudales de aguas residuales es considerablemente alto, se puede justificar asociando la condición de escenarios críticos, ya que el caudal calculado y presentado en la Tabla 9: Caudales proyectados, es el máximo que se puede llegar a generar y descargar al Río Guavio, pudiendo llegar a afectar su calidad.

Características hidráulicas y morfológicas del cuerpo receptor

En la Tabla 10: Datos del perfil transversal del Río Guavio, sector Puente Reyes, se muestran los datos obtenidos por CORPOGUAVIO mediante contratación de monitoreo, en la zona antes del vertimiento.

Tabla 10: Datos del perfil transversal del Río Guavio, sector Puente Reyes

PROFUNDIDADES (m)			VELOCIDADES (m/s)			VELOCIDAD MEDIA PARA LA SECCIÓN	PROF. MEDIA PARA LA SECCIÓN	SECCIÓN		Qp (m ³ / s)
PT	Método (%)	PM	N	VP	VMV			ANCHO (m)	(AP) (m ²)	
0,00	-	-	-	-	0,00	0,16	0,19	0,94	0,17	0,03
	0	0,00	0	0,00						
0,37	60	0,22	58	0,32	0,32	0,34	0,42	0,94	0,39	0,13
	-	-	-	-						
0,46	60	0,28	65	0,36	0,36	0,44	0,52	0,94	0,48	0,21
	-	-	-	-						
0,57	60	0,34	95	0,52	0,52	0,47	0,50	0,94	0,47	0,22
	-	-	-	-						
0,43	60	0,26	74	0,41	0,41					

PROFUNDIDADES (m)			VELOCIDADES (m/s)			VELOCIDAD MEDIA PARA LA SECCIÓN	PROF. MEDIA PARA LA SECCIÓN	SECCIÓN		Qp (m ³ /s)
PT	Método (%)	PM	N	VP	VMV			ANCHO (m)	(AP) (m ²)	
	-	-	-	-		0,43	0,49	0,94	0,46	0,20
0,55	60	0,33	83	0,46	0,46	0,45	0,57	0,94	0,53	0,24
	-	-	-	-						
0,58	60	0,35	82	0,45	0,45	0,51	0,62	0,94	0,58	0,30
	-	-	-	-						
0,65	20	0,13	94	0,52	0,56	0,50	0,60	0,94	0,56	0,28
	80	0,52	109	0,60						
0,54	60	0,32	79	0,44	0,44	0,43	0,55	0,94	0,51	0,22
	-	-	-	-						
0,55	60	0,33	77	0,42	0,42	0,43	0,56	0,94	0,53	0,23
	-	-	-	-						
0,57	60	0,34	79	0,44	0,44	0,41	0,58	0,94	0,55	0,23
	-	-	-	-						

PROFUNDIDADES (m)			VELOCIDADES (m/s)			VELOCIDAD MEDIA PARA LA SECCIÓN	PROF. MEDIA PARA LA SECCIÓN	SECCIÓN		Qp (m ³ / s)
PT	Método (%)	PM	N	VP	VMV			ANCHO (m)	(AP) (m ²)	
0,59	60	0,35	68	0,37	0,37	0,44	0,52	0,94	0,49	0,22
	-	-	-	-						
0,45	60	0,27	91	0,50	0,50	0,43	0,43	0,94	0,40	0,17
	-	-	-	-						
0,40	60	0,24	65	0,36	0,36	0,37	0,35	0,94	0,33	0,12
	-	-	-	-						
0,30	60	0,18	69	0,38	0,38	0,34	0,35	0,94	0,33	0,11
	-	-	-	-						
0,40	60	0,24	53	0,29	0,29	0,24	0,33	0,94	0,31	0,07
	-	-	-	-						
0,26	60	0,16	34	0,19	0,19	0,09	0,13	0,94	0,12	0,01
	-	-	-	-						
0,00	0	0,00	0	0,00	0,00					

PROFUNDIDADES (m)			VELOCIDADES (m/s)			VELOCIDAD MEDIA PARA LA SECCIÓN	PROF. MEDIA PARA LA SECCIÓN	SECCIÓN		Qp (m ³ /s)
PT	Método (%)	PM	N	VP	VMV			ANCHO (m)	(AP) (m ²)	
	-	-	-	-						

En la Tabla 11: Profundidad de secciones, se presenta la profundidad total de cada sección del perfil transversal del Río Guavio, antes del vertimiento

Tabla 11: Profundidad de secciones

Distancia desde la orilla (m)	Profundidad total (m)
0	0
0,94	0,37
1,88	0,46
2,82	0,57
3,76	0,43
4,7	0,55
5,64	0,58

Distancia desde la orilla (m)	Profundidad total (m)
6,58	0,65
7,52	0,54
8,46	0,55
9,4	0,57
10,34	0,59
11,28	0,45
12,22	0,4
13,16	0,3
14,1	0,4
15,04	0,26
15,98	0

Utilizando los datos de la Tabla 11: Profundidad de secciones, se elaboró la Figura 7:
 Perfil transversal del Río Guavio antes del vertimiento



Figura 7: Perfil transversal del Río Guavio antes del vertimiento

De forma similar a la figura anterior, se elaboró la Figura 8: Perfil transversal del Río Guavio después del vertimiento, utilizando los datos obtenidos por CORPOGUAVIO, mediante monitoreo aguas abajo del casco urbano del municipio de Gachetá



Figura 8: Perfil transversal del Río Guavio después del vertimiento

De los datos anteriores de destaca el caudal que puede llevar el Río Guavio de acuerdo con sus condiciones morfológicas, el cual es la suma de los caudales parciales calculados en cada sección, lo que asciende a 2984 L/s. Es importante aclarar que este trabajo utiliza datos críticos, por lo que para el caudal del río se utilizará el menor dato encontrado o calculado.

Zona de mezcla

A continuación, en la Tabla 12: Zona de mezcla, se presentan los resultados del cálculo de la zona de mezcla:

Tabla 12: Zona de mezcla

CÁLCULO DE LA ZONA DE MEZCLA DEL VERTIMIENTO DE ARD, SOBRE RÍO

ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE ARD VERTIDO		
POBLACIÓN AÑO 2020	URBANA	4.072 (hab)
	RURAL	
COTA Artículo 43. Dotación neta máxima. Resolución 0330 de 2017.	> 2000 msnm	120 (L/hab-d)
	> 1000 msnm - 2000 msnm	130 (L/hab-d)
	≤ 1000 msnm	140 (L/hab-d)
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS		
<u>Parágrafo.</u> El porcentaje de pérdidas técnicas máximas no deberá superar el 25%.		25,00%
DOTACIÓN	NETA	130 (L/hab-d)
	BRUTA	173 (L/hab-d)
VARIACIÓN MÁXIMA ANUAL DEMANDA HORARIA (K1 y K2 - Factores de mayoración QMD y QMH)	1,8	2,5
	2,5	
FACTOR DE RETORNO DEL AGUA RESIDUAL AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO (Ver recomendación del RAS)	0,8	0,8
	0,85	
CAUDAL DE AGUA RESIDUAL	MEDIO	6,54 (L/s)
	MÁXIMO	16,34 (L/s)

TIEMPO ALMACENAMIENTO CAUDAL REGULACIÓN	MEDIO	3,0 (h)
	MÁXIMO	6,0 (h)
VOLUMEN ALMACENAMIENTO CAUDAL REGULACIÓN	MEDIO	105,87 (m3)
	MÁXIMO	211,74 (m3)
CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS DEL CUERPO RECEPTOR		
Ancho medio del cuerpo de agua abajo del vertimiento:	Wmin	19,08 (m)
Profundidad media del río aguas abajo del vertimiento:	d	0,59 (m)
Velocidad de flujo medio (Promedio de las medidas de correntómetro realizadas):	u	0,41 (m/s)
Caudal instantáneo fuente receptora:	Qx	1.239,15 (L/s)
Factor de irregularidad del cauce: (cauce natural con serpentear moderado)	c	0,6
Pendiente del cauce:	s	0,0074 (m/m)
DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MEZCLA		
Velocidad de corte en metros por segundo, que se calcula con:	$u^* = \sqrt{g * d * s}$	0,207 (m/s)

Coeficiente de dispersión, aguas abajo del vertimiento en temporada de estiaje, se calcula con:	$Dy = c * d * u^*$	0,0737
Vertimiento en la orilla del río o quebrada, la longitud de la zona de mezcla se calcula con:	$LZdM = \frac{Wmin^2 * u}{2\pi Dy}$	<u>325,25 (m)</u>
Vertimiento en el centro del río o quebrada, la longitud de la zona de mezcla se calcula con:	$LZdM = \frac{Wmin^2 * u}{8\pi Dy}$	<u>81,31 (m)</u>

De acuerdo con los datos encontrados, no es necesario restringir la zona de mezcla, ya que:

- No existen usos primarios, poblacionales, agrícolas, industriales u otros de los recursos hídricos aguas abajo del vertimiento en una distancia de hasta dos (2) veces la longitud de la zona de mezcla (igual a 650 m. Aproximadamente).
- No existe un cuerpo de agua lenticó natural o artificial (embalse, lago, laguna o similares) aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (325 m).
- No existen otros vertimientos de aguas residuales al cuerpo receptor aguas abajo del vertimiento en una distancia hasta la longitud de la zona de mezcla (325 m). La PTAR La Esperanza descarga a una quebrada que tributa al Río Guavio 400 metros debajo del vertimiento unificado del casco urbano.
- La longitud de la zona de mezcla no es mayor de 500 m, que es la distancia recomendada para este tipo de casos.

Se aprecia la alta variabilidad en la distancia calculada de la zona de mezcla al variar el punto de la descarga sobre el Río Guavio, reduciéndose en un 75% al hacer el vertimiento en el centro del cuerpo de agua en lugar de una de sus orillas.

Normalmente, para realizar la descarga de aguas residuales de los cascos urbanos sobre un cuerpo de agua superficial se construye una obra de descole, que es una estructura en concreto reforzado cuya finalidad es prevenir impactos negativos por socavación; por lo que toma como referencia el valor de 325,25 metros para establecer la zona de mezcla.

Rara vez se observa una estructura de descarga que vierta al centro de los cuerpos de agua, lo que puede estar asociado con costos elevados, así como la no necesidad de restringir la zona de mezcla.

Determinación del caudal disponible para la dilución

El caudal disponible para dilución o caudal crítico es el mínimo caudal entontaron, tanto en época de lluvias como de estiaje, al cual se aplica un facto de seguridad de 2, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la guía peruana utilizada de referencia (ANA, 2017), por lo que la mirar del caudal se considera caudal ecológico o caudal mínimo para sostener el ecosistema asociado y que no puede ser utilizado para la asimilación de la carga contaminante entregada en el vertimiento del casco urbano del municipio de Gachetá.

Para estiaje:

$$Q_{dis} = \frac{Q_{estiaje}}{2}$$

$$Q_{dis} = \frac{949,2 \frac{L}{s}}{2}$$

$$Q_{dis} = 474,6 \text{ L/s}$$

Para lluvias:

$$Q_{dis} = \frac{Q_{lluvia}}{2}$$

$$Q_{dis} = \frac{978,8 \frac{\text{L}}{\text{s}}}{2}$$

$$Q_{dis} = 489,4 \text{ L/s}$$

Como era de esperarse, el caudal disponible en época de lluvia es superior al caudal en época de estiaje, sin embargo, la diferencia no es mucha, lo que puede estar asociado a mediciones en condiciones de variabilidad climática.

El caudal disponible para la dilución considera un factor de seguridad de 2 (ANA, 2017), lo que se traduce en que solo la mitad del caudal medido es considerado para asimilar la carga contaminante entregada por el casco urbano de Gachetá al Río Guavio.

El factor de seguridad se asocia a la protección de la fuente hídrica, así como de caudal ecológico, que es la cantidad mínima de agua que debe permanecer en el cauce del río para conservar la biodiversidad asociada a la fuente hídrica

Balance de masas, Cálculo de ICA y Cálculo de tasa retributiva

Debido a la cantidad de cálculos realizados, en esta sección se describe un ejemplo de cada uno y se presentan tablas resumen de la totalidad de los cálculos, los cuales pueden ser

verificados en las hojas de cálculo anexas. Los ejemplos presentados responden al primer escenario.

Balance de masas.

Tabla 13: Balance de masas

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR EN RÍO (r)	VALOR EN VERTIMIENTO (v)	VALOR DESPUÉS (d)
CAUDAL	(L/s)	474,6	1,92	476,5
[DQO]	(mg/L)	10	432,77	11,70
[DBO5]	(mg/L)	2,1	217,45	2,97
[SST]	(mg/L)	283	173,67	282,56

Para DQO:

$$DQO_d = \frac{DQO_r * Q_r + DQO_v * Q_v}{Q_r + Q_v}$$

$$DQO_d = \frac{10 \frac{mg}{L} * 474,6 \frac{L}{s} + 432,77 \frac{mg}{L} * 1,92 \frac{L}{s}}{474,6 \frac{L}{s} + 1,92 \frac{L}{s}}$$

$$DQO_d = 11,70 \frac{mg}{L}$$

Para DBO5:

$$DBO5_d = \frac{DBO5_r * Q_r + DBO5_v * Q_v}{Q_r + Q_v}$$

$$DBO5_d = \frac{2,1 \frac{mg}{L} * 474,6 \frac{L}{s} + 217,45 \frac{mg}{L} * 1,92 \frac{L}{s}}{474,6 \frac{L}{s} + 1,92 \frac{L}{s}}$$

$$DBO5_d = 2,97 \frac{mg}{L}$$

Para SST:

$$SST_d = \frac{SST_r * Q_r + SST_v * Q_v}{Q_r + Q_v}$$

$$SST_d = \frac{283 \frac{mg}{L} * 474,6 \frac{L}{s} + 173,67 \frac{mg}{L} * 1,92 \frac{L}{s}}{474,6 \frac{L}{s} + 1,92 \frac{L}{s}}$$

$$SST_d = 282,56 \frac{mg}{L}$$

El aumento en la concentración de los parámetros mostrados, en el Río Guavio tras la descarga de aguas residuales del casco urbano de Gachetá, es mínimo, lo cual se debe al reducido caudal del vertimiento, que es 247 veces menor que el del cuerpo de agua receptor, por lo que la capacidad que tiene el río para asimilar la descarga es alta.

8.7.2. ICA

Tabla 14: Cálculo de ICA

PARÁMETRO	UNIDAD	% ICA- IDEAM	VALOR ANTES (a)	ICA ANTES (a)	VALOR ICA
pH	Unidades de pH	15%	8,03	0,9846	0,1477
CONDUCTIVIDAD	(μ S/m)	17%	220	0,2434	0,0414
OD	% Saturación	17%	73,4	0,7340	0,1248
[DQO]	(mg/L)	17%	10	0,9100	0,1547
[SST]	(mg/L)	17%	283	0,1710	0,0291
PT	(mg/L)		0,5		
NT	(mg/L)		0,1		
NT/PT		17%	5	0,3500	0,0602
TOTAL					0,5578

pH

Si $\text{pH} < 4$, entonces $I_{\text{pH}} = 0,1$

Si $4 < \text{pH} < 7$, entonces $I_{\text{pH}} = 0,02628419 * e^{\text{pH} * 0,520025}$

Si $7 < \text{pH} < 8$, entonces $I_{\text{pH}} = 1$

Si $8 < \text{pH} < 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 1 * e^{(\text{pH}-8)-0,5187742}$

Si $\text{pH} > 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 0,1$

Como el pH es de 8.03, entonces

$$I_{\text{pH}} = 1 * e^{(\text{pH}-8)-0,5187742}$$

$$I_{\text{pH}} = 1 * e^{(8,03-8)-0,5187742}$$

$$I_{\text{pH}} = 0,9846$$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{\text{pH}} = I_{\text{pH}} * \text{Ponderado}$$

$$ICA_{\text{pH}} = 0,9846 * 15\%$$

$$ICA_{\text{pH}} = 0,1477$$

Conductividad (CE)

$$I_{\text{CE}} = 1 - 10^{-3,26-1,34\text{Log}10(\text{CE})}$$

$$I_{\text{CE}} = 1 - 10^{-3,26-1,34\text{Log}10(220)}$$

$$I_{\text{CE}} = 0,2434$$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{\text{CE}} = I_{\text{CE}} * \text{Ponderado}$$

$$ICA_{\text{CE}} = 0,2434 * 17\%$$

$$ICA_{\text{CE}} = 0,0414$$

OD

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * OD)$$

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * 73,4)$$

$$I_{OD} = 0,7340$$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{OD} = I_{OD} * Ponderado$$

$$ICA_{OD} = 0,7340 * 17\%$$

$$ICA_{OD} = 0,1248$$

DQO

Si $DQO < 20$, entonces $I_{DQO} = 0,91$

Si $20 < DQO < 25$, entonces $I_{DQO} = 0,71$

Si $25 < DQO < 40$, entonces $I_{DQO} = 0,51$

Si $40 < DQO < 80$, entonces $I_{DQO} = 0,26$

Si $DQO > 80$, entonces $I_{DQO} = 0,125$

Como DQO es 10, entonces $I_{DQO} = 0,9100$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{DQO} = I_{DQO} * Ponderado$$

$$ICA_{DQO} = 0,9100 * 17\%$$

$$ICA_{DQO} = 0,1547$$

SST

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 * SST)$$

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 * 283)$$

$$I_{SST} = 0,1710$$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{SST} = I_{SST} * Ponderado$$

$$ICA_{SST} = 0,1710 * 17\%$$

$$ICA_{SST} = 0,0291$$

NT/PT

Si $15 < NT / PT > 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0,8$

Si $10 < NT / PT > 15$, entonces $I_{NT/PT} = 0,6$

Si $5 < NT / PT > 10$, entonces $I_{NT/PT} = 0,35$

Si $NT / PT < 5$, o $NT / PT > 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0,15$

Como NT / PT es 5, entonces $I_{NT/PT} = 0,35$

Multiplicando por el porcentaje ponderado correspondiente

$$ICA_{NT/PT} = I_{NT/PT} * Ponderado$$

$$ICA_{NT/PT} = 0,3500 * 17\%$$

$$ICA_{NT/PT} = 0,0602$$

Finalmente se calcula el ICA mediante la sumatoria de los ICAs ponderados de cada parámetro

$$ICA = \sum ICA_i$$

$$ICA = 0,1477 + 0,0414 + 0,1248 + 0,1547 + 0,0291 + 0,0602$$

$$ICA = 0,5578$$

8.7.3. Tasa retributiva

Para DBO5

$$TR_{DBO5} = Cv * Qv * FR * t * \$DBO5$$

$$TR_{DBO5} = 217,45 \frac{mg}{L} * 1,92 \frac{L}{s} * 1 * \frac{86400s}{día} * \frac{365días}{año} * \frac{Kg}{1000000mg} * 154,65 \frac{pesos}{Kg}$$

$$TR_{DBO5} = 2030907 \text{ pesos}$$

Para SST

$$TR_{SST} = Cv * Qv * FR * t * \$SST$$

$$TR_{SST} = 173,67 \frac{mg}{L} * 1,92 \frac{L}{s} * 1 * \frac{86400s}{día} * \frac{365días}{año} * \frac{Kg}{1000000mg} * 66,13 \frac{pesos}{Kg}$$

$$TR_{SST} = 693582 \text{ pesos}$$

Tasa retributiva

Para determinar la tasa retributiva a pagas, simplemente se suman los valores parciales de cobro por parámetro

$$TR = TR_{DBO5} + TR_{SST}$$

$$TR = 2030907 \text{ pesos} + 693582 \text{ pesos}$$

$$TR = 2724490 \text{ pesos}$$

La tasa retributiva considera un factor multiplicativo llamado “factor regional” el cual varía entre 1 y 5,5; dicho factor se considera en uno para efectos del presente trabajo, sin embargo, en el cobro real de la tasa dicho factor puede ser aumentado por la autoridad ambiental en función del incumplimiento normativo, lo que aumentaría considerablemente el valor facturado por concepto de tasa retributiva.

A continuación, se presentan los resultados de los escenarios evaluados en las tablas se muestran los cambios en las concentraciones de los parámetros, así como los cálculos de ICA y de tasa retributiva, seguidas de su respectivo análisis.

ESCENARIO 1

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA														
ESCENARIO 1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD					CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARD				
DESCARGA DE ARD SIN TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE ESTIAJE	Sector Puente Reyes					Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631- 2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA- IDEAM
	CAUDAL	(l/s)		474,6				1,92				476,5		
	pH	Unidades de pH	0,9846	8,03		15%	6 - 9	7,77		Cumple	0,9851	8,03		15%
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,2434	220		17%		235,27			0,2432	220,06		17%
	OD	% Saturación	0,7340	73,4		17%		42,03			0,7327	73,27		17%
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10	410,0 - Kg/d	17%	180	432,77	71,6 - Kg/d	No Cumple	0,9100	11,70	481,6 - Kg/d	17%
	[DBO5]	(mg/L)		2,1	86,1 - Kg/d		90	217,45	36,0 - Kg/d	No Cumple		2,97	122,1 - Kg/d	
	[SST]	(mg/L)	0,1710	283	11604,1 - Kg/d	17%	90	173,67	28,7 - Kg/d	No Cumple	0,1723	282,56	11632,8 - Kg/d	17%
	PT	(mg/L)		0,5	20,5 - Kg/d			50,68	8,4 - Kg/d			0,702	28,9 - Kg/d	
	NT	(mg/L)		0,1	4,1 - Kg/d			8,58	1,4 - Kg/d			0,13	5,5 - Kg/d	
	NT/PT		0,3539	5		17%		6,46			0,1000	0,19		17%
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4	164,0 - Kg/d		20	63,97	10,6 - Kg/d	No Cumple		4,24	174,6 - Kg/d	
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,5578	Calidad Regular		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 2.724.490 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,5147	Calidad Regular	
						TOTAL CARGA DBO5		36,0 - Kg/d		100%				
						TOTAL CARGA SST		28,7 - Kg/d		100%				

ESCENARIO 2

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA														
ESCENARIO 2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD					CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD CON TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE ESTIAJE	Sector Puente Reyes					Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631- 2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA- IDEAM
	CAUDAL	(l/s)		474,6			0	1,92				476,5		
	pH	Unidades de pH	0,9846	8,03		15%	6 - 9	7,77		Cumple	0,9851	8,03		15%
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,2434	220,00		17%		235,27			0,2432	220,06		17%
	OD	% Saturación	0,7340	73,40		17%		42,03			0,7327	73,27		17%
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	410,0 - Kg/d	17%	180	126,59	20,9 - Kg/d	Cumple	0,9100	10,47	431,0 - Kg/d	17%
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	86,1 - Kg/d		90	58,30	9,6 - Kg/d	Cumple		2,33	95,8 - Kg/d	
	[SST]	(mg/L)	0,1710	283,00	11604,1 - Kg/d	17%	90	57,75	9,6 - Kg/d	Cumple	0,1737	282,09	11613,6 - Kg/d	17%
	PT	(mg/L)		0,50	20,5 - Kg/d			50,68	8,4 - Kg/d			0,702	28,9 - Kg/d	
	NT	(mg/L)		0,10	4,1 - Kg/d			5,58	0,9 - Kg/d			0,12	5,0 - Kg/d	
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		6,46			0,1000	0,17		17%
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	164,0 - Kg/d		20	20,00	3,3 - Kg/d	Cumple		4,06	167,3 - Kg/d	
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,5578	Calidad Regular		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 775.153 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,5149	Calidad Regular	
						TOTAL CARGA DBO5		9,6 - Kg/d		100%				
						TOTAL CARGA SST		9,6 - Kg/d		100%				

ESCENARIO 3

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA														
ESCENARIO 3	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD					CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD SIN TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE LLUVIA	Sector Puente Reyes					Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631- 2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA- IDEAM
	CAUDAL	(L/s)		<u>489,4</u>				6,72					<u>496,1</u>	
	pH	Unidades de pH	1,0000	7,50		15%	6 - 9	7,27		Cumple	1,0000	7,50		15%
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,8961	50,00		17%		869,69			0,8641	61,10		17%
	OD	% Saturación	0,8582	85,82		17%		24,90			0,8499	84,99		17%
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	422,8 - Kg/d	17%	180	549,65	319,1 - Kg/d	No Cumple	0,9100	17,31	741,9 - Kg/d	17%
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	88,8 - Kg/d		90	222,38	129,1 - Kg/d	No Cumple		5,08	217,9 - Kg/d	
	[SST]	(mg/L)	0,8310	63,00	2663,8 - Kg/d	17%	90	116,49	67,6 - Kg/d	No Cumple	0,8288	63,72	2731,4 - Kg/d	17%
	PT	(mg/L)		0,50	21,1 - Kg/d			47,84	27,8 - Kg/d			1,141	48,9 - Kg/d	
	NT	(mg/L)		0,10	4,2 - Kg/d			5,56	3,2 - Kg/d			0,17	7,5 - Kg/d	
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		8,44			0,1000	0,15		17%
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	169,1 - Kg/d		20	88,03	51,1 - Kg/d	No Cumple		5,14	220,2 - Kg/d	
	ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,8044	Calidad Aceptable		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 8.920.770 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,7540	Calidad Aceptable
						TOTAL CARGA DBO5		129,1 - Kg/d		100%				
						TOTAL CARGA SST		67,6 - Kg/d		100%				

ESCENARIO 4

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA														
ESCENARIO 4	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD					CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD CON TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE LLUVIA	Sector Puente Reyes					Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631- 2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA- IDEAM
	CAUDAL	(L/s)		489,4				6,72				496,1		
	pH	Unidades de pH	1,0000	7,50		15%	6 - 9	7,27		Cumple	1,0000	7,50		15%
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,8961	50,00		17%		869,69			0,8641	61,10		17%
	OD	% Saturación	0,8582	85,82		17%		24,90			0,8499	84,99		17%
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	422,8 - Kg/d	17%	180	160,77	93,3 - Kg/d	Cumple	0,9100	12,04	516,2 - Kg/d	17%
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	88,8 - Kg/d		90	59,63	34,6 - Kg/d	Cumple		2,88	123,4 - Kg/d	
	[SST]	(mg/L)	0,8310	63,00	2663,8 - Kg/d	17%	90	38,73	22,5 - Kg/d	Cumple	0,8320	62,67	2686,3 - Kg/d	17%
	PT	(mg/L)		0,50	21,1 - Kg/d			47,84	27,8 - Kg/d			1,141	48,9 - Kg/d	
	NT	(mg/L)		0,10	4,2 - Kg/d			3,62	2,1 - Kg/d			0,15	6,3 - Kg/d	
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		8,44			0,1000	0,13		17%
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	169,1 - Kg/d		20	20,00	11,6 - Kg/d	Cumple		4,22	180,7 - Kg/d	
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,8044	Calidad Aceptable		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 2.496.978 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,7545	Calidad Aceptable	
						TOTAL CARGA DBO5		34,6 - Kg/d	100%					
						TOTAL CARGA SST		22,5 - Kg/d	100%					

ESCENARIO 5

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA															
ESCENARIO 5	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD					CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD					
DESCARGA DE ARD SIN TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE ESTIAJE 2045	Sector Puente Reyes					Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD					
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631-2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	
	CAUDAL	(L/s)		474,6				31,35					505,9		
	pH	Unidades de pH	0,9846	8,03		15%	6 - 9	7,77		Cumple	0,9927	8,01		15%	
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,2434	220		17%		235,27			0,2391	220,95		17%	
	OD	% Saturación	0,7340	73,4		17%		42,03			0,7146	71,46		17%	
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10	410,0 - Kg/d	17%	180	432,77	1172,3 - Kg/d	No Cumple	0,5178	36,20	1582,3 - Kg/d	17%	
	[DBO5]	(mg/L)		2,1	86,1 - Kg/d		90	217,45	589,0 - Kg/d	No Cumple		15,45	675,1 - Kg/d		
	[SST]	(mg/L)	0,1710	283	11604,1 - Kg/d	17%	90	173,67	470,4 - Kg/d	No Cumple	0,1913	276,22	12074,5 - Kg/d	17%	
	PT	(mg/L)		0,5	20,5 - Kg/d			50,68	137,3 - Kg/d			3,610	157,8 - Kg/d		
	NT	(mg/L)		0,1	4,1 - Kg/d			8,58	23,2 - Kg/d			0,63	27,3 - Kg/d		
	NT/PT		0,3539	5		17%		6,46			0,1000	0,17		17%	
[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4	164,0 - Kg/d		20	63,97	173,3 - Kg/d	No Cumple		7,72	337,3 - Kg/d			
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,5578	Calidad Regular		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 44.604.813 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES	0,4486	Calidad Mala			
						TOTAL CARGA DBO5		589,0 - Kg/d	100%						
						TOTAL CARGA SST		470,4 - Kg/d	100%						

ESCENARIO 6

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA															
ESCENARIO 6	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD						CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD CON TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE ESTIAJE 2045	Sector Puente Reyes						Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631-2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	
	CAUDAL	(L/s)		474,6			0	31,35					505,9		
	pH	Unidades de pH	0,9846	8,03		15%	6 - 9	7,77		Cumple	0,9927	8,01		15%	
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,2434	220,00		17%		235,27			0,2391	220,95		17%	
	OD	% Saturación	0,7340	73,40		17%		42,03			0,7146	71,46		17%	
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	410,0 - Kg/d	17%	180	126,59	342,9 - Kg/d	Cumple	0,9100	17,22	752,9 - Kg/d	17%	
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	86,1 - Kg/d		90	58,30	157,9 - Kg/d	Cumple		5,58	244,0 - Kg/d		
	[SST]	(mg/L)	0,1710	283,00	11604,1 - Kg/d	17%	90	57,75	156,4 - Kg/d	Cumple	0,2129	269,04	11760,5 - Kg/d	17%	
	PT	(mg/L)		0,50	20,5 - Kg/d			50,68	137,3 - Kg/d			3,610	157,8 - Kg/d		
	NT	(mg/L)		0,10	4,1 - Kg/d			5,58	15,1 - Kg/d			0,44	19,2 - Kg/d		
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		6,46			0,1000	0,12		17%	
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	164,0 - Kg/d		20	20,00	54,2 - Kg/d	Cumple		4,99	218,2 - Kg/d		
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,5578	Calidad Regular		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 12.690.656 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,5189	Calidad Regular		
						TOTAL CARGA DBO5		157,9 - Kg/d		100%					
						TOTAL CARGA SST		156,4 - Kg/d		100%					

ESCENARIO 7

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA															
ESCENARIO 7	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD						CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD SIN TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE LLUVIA 2045	Sector Puente Reyes						Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631-2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	
	CAUDAL	(L/s)		489,4				31,35					520,7		
	pH	Unidades de pH	1,0000	7,50		15%	6 - 9	7,27		Cumple	1,0000	7,49		15%	
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,8961	50,00		17%		869,69			0,7393	99,35		17%	
	OD	% Saturación	0,8582	85,82		17%		24,90			0,8215	82,15		17%	
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	422,8 - Kg/d	17%	180	549,65	1488,9 - Kg/d	No Cumple	0,5152	42,49	1911,7 - Kg/d	17%	
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	88,8 - Kg/d		90	222,38	602,4 - Kg/d	No Cumple		15,36	691,2 - Kg/d		
	[SST]	(mg/L)	0,8310	63,00	2663,8 - Kg/d	17%	90	116,49	315,6 - Kg/d	No Cumple	0,8213	66,22	2979,3 - Kg/d	17%	
	PT	(mg/L)		0,50	21,1 - Kg/d			47,84	129,6 - Kg/d			3,350	150,7 - Kg/d		
	NT	(mg/L)		0,10	4,2 - Kg/d			5,56	15,1 - Kg/d			0,43	19,3 - Kg/d		
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		8,44			0,1000	0,13		17%	
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	169,1 - Kg/d		20	88,03	238,4 - Kg/d	No Cumple		9,06	407,6 - Kg/d		
	ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,8044	Calidad Aceptable			COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 41.619.640 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES	0,6595	Calidad Regular	
							TOTAL CARGA DBO5		602,4 - Kg/d	100%					
							TOTAL CARGA SST		315,6 - Kg/d	100%					

ESCENARIO 8

SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO GUAVIO POR EL VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PROVENIENTES DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE GACHETÁ, MEDIANTE BALANCES DE MASA															
ESCENARIO 8	CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL (RÍO GUAVIO), ANTES DEL VERTIMIENTO DE ARD						CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL VERTIMIENTO DE ARD				CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LA FUENTE HÍDRICA DESPUÉS DEL VERTIMIENTO DE ARnD				
DESCARGA DE ARD CON TRATAMIENTO EN ÉPOCA DE LLUVIA 2045	Sector Puente Reyes						Descarga unificada				Aguas abajo del Vertimiento de ARnD				
	PARÁMETRO	UNIDAD	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	LMP (R.0631-2015)	CANTIDAD	CARGA	CUMPLIMIENTO RES.0631-2015	ICA	CANTIDAD	CARGA	% ICA-IDEAM	
	CAUDAL	(L/s)		489,4				31,35					520,7		
	pH	Unidades de pH	1,0000	7,50		15%	6 - 9	7,27		Cumple	1,0000	7,49		15%	
	CONDUCTIVIDAD	(µS/m)	0,8961	50,00		17%		869,69			0,7393	99,35		17%	
	OD	% Saturación	0,8582	85,82		17%		24,90			0,8215	82,15		17%	
	[DQO]	(mg/L)	0,9100	10,00	422,8 - Kg/d	17%	180	160,77	435,5 - Kg/d	Cumple	0,9100	19,08	858,3 - Kg/d	17%	
	[DBO5]	(mg/L)		2,10	88,8 - Kg/d		90	59,63	161,5 - Kg/d	Cumple		5,56	250,3 - Kg/d		
	[SST]	(mg/L)	0,8310	63,00	2663,8 - Kg/d	17%	90	38,73	104,9 - Kg/d	Cumple	0,8354	61,54	2768,7 - Kg/d	17%	
	PT	(mg/L)		0,50	21,1 - Kg/d			47,84	129,6 - Kg/d			3,350	150,7 - Kg/d		
	NT	(mg/L)		0,10	4,2 - Kg/d			3,62	9,8 - Kg/d			0,31	14,0 - Kg/d		
	NT/PT		0,3539	5,00		17%		8,44			0,1000	0,09		17%	
	[Grasas-Aceites]	(mg/L)		4,00	169,1 - Kg/d		20	20,00	54,2 - Kg/d	Cumple		4,96	223,3 - Kg/d		
ICA - IDEAM PARA 6 VARIABLES			0,8044	Calidad Aceptable		COBRO POR TASA RETRIBUTIVA		\$ 11.649.589 - PESOS		ICA - IDEAM 6 VARIABLES		0,7290	Calidad Aceptable		
						TOTAL CARGA DBO5		161,5 - Kg/d	100%						
						TOTAL CARGA SST		104,9 - Kg/d	100%						

Una vez evaluados los ocho escenarios, en los que se contempló el impacto ambiental generado al Río Guavio, por la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá, así como sus implicaciones económicas, se hace evidente que el tratamiento de las aguas antes de hacer su descarga al cuerpo de agua receptor, es de suma importancia, no solo para prevenir el deterioro de la calidad del Río Guavio, sino también para reducir considerablemente los costos asociados con la tasa retributiva, los cuales para una población proyectada en un periodo de diseño de 25 años, llegan hasta los \$ 44.604.813 anuales para una descarga sin vertimientos, mientras que al tratar el agua, dicho costo se reduce a \$ 12.690.656 anuales, lo que significa una reducción del 72%.

En cuanto a calidad, se hace evidente que el vertimiento futuro puede cambiar significativamente la calidad del Río Guavio, pudiendo ser mala en época de estiaje y sin tratamiento y pasando de aceptable a regular en época de lluvia y sin tratamiento. En todos los escenarios con tratamiento se observan las implicaciones del mismo, ya que el cuerpo de agua receptor no ve notablemente afectada su calidad y el costo por tasa retributiva es menor.

Considerando la PTAR contemplada, es importante destacar el tipo de tratamiento, ya que es anaerobio, propio para altas cargas orgánicas que responden a las condiciones del casco urbano y que además requiere de menores costos para operación y mantenimiento. Cabe mencionar que un sistema aerobio demanda grandes cantidades de energía lo que se traduce en elevados costos de operación y mantenimiento de los equipos electromecánicos pudiendo hacer inviable el tratamiento; tal es el caso de la PTAR de la urbanización La Esperanza, cerca al casco urbano del municipio de Gachetá la cual emplea un tratamiento aerobio, pero no se encuentra en funcionamiento debido a que el municipio no la puede mantener.

Conclusiones

El casco urbano del municipio de Gachetá genera 1,92 L/s de aguas residuales que son vertidas sin tratamiento alguno al Río Guavio en tres puntos de descarga.

Los vertimientos actuales del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio no cumplen con la norma de vertimientos, superando los límites máximos permisibles de DQO, DBO5, SST, así como de grasas y aceites, llegando a superar en más del 200% el LMP de DQO, aproximadamente 150% el LMP de DBO5, 93% el LMP de SST y 240% el LMP de grasas y aceites.

De acuerdo con las proyecciones a partir de datos obtenidos del DANE, se espera que para el 2045 la población del casco urbano de Gachetá sea de 6.129 habitantes, que podrían llegar a generar hasta 31,35 L/s de aguas residuales de origen doméstico.

Para las condiciones del Río Guavio y del vertimiento, encontradas en los monitoreos realizados por CORPOGUAVIO en el año 2019, tanto para época de lluvia como de estiaje, la concentración de los constituyentes aguas abajo del vertimiento no se ven notablemente alteradas debido al bajo caudal de la descarga comparado con el caudal del Río Guavio, por lo que a pesar de que el vertimiento presenta concentraciones elevadas con hasta 549 mg/L de DQO, 222 mg/L de DBO5, 174 mg/L de SST y 88 mg/L de grasas y aceites, datos por encima de los límites establecidos en la norma de vertimientos; por lo que la carga contaminante resultante de multiplicar el caudal por la concentración es baja.

Para escenarios futuros, proyectando la población al 2045 a partir de datos obtenidos del DANE, el caudal de la descarga calculado según los lineamientos de la Resolución 0330 de 2017 llegaría a los 31,35 L/s, por lo que, manteniéndose los valores de concentración actuales sin tratamiento, la concentración de los parámetros en el Río Guavio se ven notablemente

alterados, aumentando la DQO desde 17,31 mg/L hasta 36,2 mg/L, la DBO5 pasa de 5,08 mg/L a 15,45 mg/L, SST sube desde 63,72 mg/L hasta 276,22 mg/L y las grasas y aceites pasan de 5,14 mg/L a 7,72 mg/L.

En todos los escenarios con tratamiento del vertimiento evaluados, el cambio en la concentración de los parámetros fisicoquímicos pH, CONDUCTIVIDAD, OD, DQO, DBO5, SST, PT, NT, NT/PT y Grasas-Aceites, en el Río Guavio, ocasionado por la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá es relativamente bajo, pasando de 10,0 mg/L a 17,22 mg/L en DQO, de 2,1 mg/L a 5,58 mg/L de DBO y de 283,0 mg/L a 269,04 mg/l de SST, por lo que no se impacta considerablemente al cuerpo de agua receptor lo cual se ve reflejado el ICA, el cual no se ve modificado por la descarga del municipio de Gachetá.

En los ocho escenarios evaluados, el cambio en la concentración de pH en el Río Guavio producto de la descarga de aguas residuales del casco urbano de Gachetá es nulo, mientras que la conductividad en escenarios actuales puede pasar de 50,0 $\mu\text{S}/\text{m}$ a 61,1 $\mu\text{S}/\text{m}$ y en escenarios prospectivos puede llegar a 99,35 $\mu\text{S}/\text{m}$, lo que representa un aumento del 99%; en cuanto al oxígeno disuelto, este se ve levemente reducido, entre el 0% y el 4% en los diferentes escenarios; La DQO y la DBO pueden verse aumentadas en 325% y 632% respectivamente en el Río Guavio en escenarios prospectivos si no se implementa un tratamiento; sin embargo, la concentración de SST se puede ver levemente reducida, con un 2% después de la descarga, debido a que en el Río Puede presentar altos sólidos en épocas de lluvia, superando la concentración del vertimiento; finalmente, la concentración de grasas y aceites se puede ver elevada en 126% en un escenario prospectivo sin tratamiento, lo que contrasta con un aumento del 24 % al implementar el tratamiento.

El tratamiento del vertimiento es necesario para prevenir la contaminación del Río Guavio y deducir los costos asociados con la tasa retributiva, ya que la descarga sin tratamiento puede

deteriorar significativamente la calidad del Río Guavio en época de estiaje y generar facturación por las de cuarenta y cuatro millones de pesos anuales por tasa retributiva.

El cobro por tasa retributiva actualmente puede ascender a los \$ 2.724.490 de pesos si se toma como referencia el monitoreo realizado en época de estiaje y a \$ 8.920.770 si se calcula a partir del monitoreo en época de lluvia.

Al implementar una planta de tratamiento de aguas residuales, los cobros por tasa retributiva serían de \$ 775.153 pesos o \$ 2.496.978 si los cálculos se hacen con base en los monitoreos de estiaje y lluvias respectivamente.

En escenarios futuros, el cobro por tasa retributiva podría ascender a \$ 44.604.813 de pesos si no se implementa una planta de tratamiento funcional; mientras que con una PTAR operando lo costos serían de hasta \$ 12.690.656 de pesos.

Recomendaciones

Como último componente de este trabajo de grado y habiendo analizado las implicaciones derivadas de la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá al Río Guavio, nos permitimos recomendar a las partes involucradas lo siguiente:

Al municipio de Gachetá, gestionar los recursos necesarios para poder dar tratamiento a las aguas residuales que se vierten al Río Guavio, construyendo la PTAR que se tiene contemplada, tan pronto como sea posible

A La Corporación Autónoma Regional del Guavio CORPOGUAVIO, apoyar técnica y económicamente al municipio de Gachetá, para la construcción de la PTAR, toda vez que mediante su puesta en funcionamiento se protegen los recursos naturales de su jurisdicción, lo que responde a su misión como entidad ambiental

A los habitantes del casco urbano del municipio de Gachetá, hacer uso eficiente y ahorro del agua y evitar arrojar basuras al sistema de alcantarillado, lo que permitirá reducir la afectación negativa al Río Guavio

A las instituciones educativas, continuar con el análisis de la información cruda o primaria levantada por CORPOGUAVIO y el municipio de Gachetá, con el propósito de que sirva para la toma de decisiones

Bibliografía

- ACUATECNICA LTDA . (7 de Julio de 2016). *Tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de acuatecna: <https://acuatecnica.com/tipos-plantas-tratamiento-aguas-residuales/>
- ANA. (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Lima: Perú.
- Arbelaez, K., & Parra, M. (2017). *Análisis del impacto ambiental y social de la planta de tratamiento de aguas residuales Barra Da Tijuca en Brasil colo lecciones aprendidas para la ciudad de Bogotá (tesis de pregrado)*. Universidad Católica de Colombia: Bogotá, Colombia.
- Caviedes Rubio, D., Muñoz Calderón, R., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1):73-90.
- CORPOGUAVIO. (2018). *Histórico Caracterización de cantidad y calidad del agua - Municipio Gachatá*. Gachalá: Histórico caracterización de cantidad y calidad del agua municipio de Gachetá.
- Corporación Autónoma Regional del Guavio. (2012). *Resolución no 863 de 2017 Por medio de la cual se ajustan y complementan los objetivos de calidad para las fuentes hídricas superficiales en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Guavio* —

CORPOGUAVIO, y se toman otras determinaciones. Gachalá Cundinamarca:
Corporación Autónoma Regional del Guavio.

Corporación Autónoma Regional del Guavio. (11 de julio de 2019). *Boletín 170/19- PTAR*

JUNIN una apuesta por mejorar la calidad de vida de la comunidad del municipio.

Obtenido de <https://www.corpoguavio.gov.co/listarticulos/ArticleId/4010/boletn-17019-ptar-junin-una-apuesta-por-mejorar-la-calidad-de-vida-de-la-comunidad-del-municipio>

Eco - Intellutions. (13 de Febrero de 2019). *Tipos de Aguas Residuales, ¿cuántos existen y qué*

contienen? Obtenido de ecointellutions: [http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-](http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,a)

[tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-](http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,a)

[contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,a](http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,a)
[agua%20que%20utilizas%20al%20ba%C3%B1arte.](http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,a)

IDEAM. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00).*

Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua

superficial. 10 p. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales - IDEAM.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015 Por la cual se*

establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos

puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y

se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2015). *Decreto 1076, Por medio*

del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo

Sostenible. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Transporte. (2006). *Estudio e Investigación del Estado Actual de las Obras de la Red Nacional de Carreteras (Manual para la inspección visual de estructuras de drenaje)*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2017). *Resolución 0330 Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009*. Bogotá D.C.: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Morales, H. (2013). *Taponamiento de alcantarillado es debido al mal uso de parte de los habitantes*. Obtenido de EMSERPA E.I.C.E., E,S,P:
<https://www.emserpa.gov.co/sitio/es/467-taponamiento-de-alcantarillado-es-debido-al-mal-uso-de-parte-de-los-habitantes-ingeniero-operativo-de-emserpa.html>

Murgen, S. (1984). *Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales*. Ser. Biol. Monogr. 28, OEA: 120 pp.

Rodríguez Miranda, J., García Ubaque, C., & Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, DOI:
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12>.

Rodríguez Pimentel, H. (17 de marzo de 2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>

Rodríguez, A. J. (2015). *Metodología para el análisis de zonas de mezcla de vertimientos puntuales en medios pluviales (Tesis de doctorado)*. Universidad de Cantabria: Santander, España.

Romero Rojas, J. A. (2005). *Tratamiento de aguas residuales; Teoría y principios de diseño*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rotoplast. (2012). *Sistema séptico domiciliario*. Obtenido de Rotoplast:
<http://www.rotoplast.com.co/sistema-septico-domiciliario/>

Salas, H., & Martino, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de lagos cálidos tropicales*. Lima.

SYSCOL Consultores SAS. (2019). *Informe de caracterización de cuerpos hídricos. Gachetá Cundinamarca*. Gachalá Cundinamarca: Corporación Autónoma Regional del Guavio CORPOGUAVIO.

Tutoriales al día-Ingeniería Civil. (2020). *Dos Métodos para la Estimación de Poblaciones Futuras*. Obtenido de Abastecimiento de agua:
<http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/dos-metodos-para-la-estimacion-de-poblaciones-futuras/>

Uniminuto. (2001). *Origen y Características de las aguas residuales*. Obtenido de PTAR-Uniminuto: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>

RESUMEN ANAÍTICO ESPECIALIZADO - RAE	
1. INFORMACIÓN GENERAL	
Título	Evaluación Del Impacto Del Vertimientos De Aguas Residuales Del Casco Urbano Del Municipio De Gachetá Sobre El Río Guavio
Autor	Brighi Dayana Beltrán Martín, Yarid Marcela Rodríguez Urrego.

Tipo de Documento	Monografía
Director	Jessica Paola Páez Pedraza
Año	2020
Palabras Clave	Calidad, Vertimiento, Tratamiento, Tasa retributiva.

2. RESUMEN

El casco urbano del municipio de Gachetá descarga sus aguas residuales al Río Guavio sin tratamiento alguno, por lo que se tiene contemplada la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para reducir el impacto ambiental ocasionado. De modo que en este proyecto de grado se analizan las implicaciones derivadas de la descarga del casco urbano, con el fin de establecer el nivel de impacto en distintos escenarios mediante un modelo matemático que contempla condicione críticas y además se comparan los escenarios en cuanto a calidad y costos, para establecer el grado de afectación por la descarga y los costos relacionados con la tasa retributiva.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La región del Guavio se caracteriza por abundancia del recurso hídrico, así como por la falta de tratamiento de las aguas residuales que generan sus centros poblados y que se descargan a los cuerpos de agua superficiales. Tal es el caso del municipio de Gachetá, que no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales PTAR en su casco urbano, por lo que entrega las aguas residuales sin tratamiento alguno, en el Río Guavio; razón por la cual el municipio podría generar contaminación en el cuerpo de agua receptor, entendiéndose dicha contaminación como el cambio significativo en las concentraciones de los constituyentes del Río Guavio producto del vertimiento del casco urbano de Gachetá. Además, la falta de la PTAR ocasiona que el municipio no tenga permiso de vertimientos, por lo que CORPOGUAVIO obliga al municipio a implementar un plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV), con el propósito de unir las descargas existentes y construir la PTAR, de modo que una vez terminado el periodo de ejecución del PSMV, el municipio tramite su permiso de vertimientos.

Cabe mencionar que la falta de tratamiento en los vertimientos del casco urbano del municipio de Gachetá, así como la falta del permiso de vertimientos, podrían derivar en procesos sancionatorios, por incumplimientos de LMP (Resolución 0631 de 2015) e inexistencia de la autorización para realizar vertimientos (Decreto 1076 de 2015).

En concordancia, el objeto del presente trabajo busca responder la pregunta: ¿Cómo determinar el impacto generado por la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio, con y sin tratamiento?

4. OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar el impacto y el costo asociado a tasa retributiva por el vertimiento de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio, bajo el escenario actual y prospectivo.

Objetivos Específicos

- Determinar el cambio en la concentración de los parámetros fisicoquímicos pH, CONDUCTIVIDAD, OD, DQO, DBO5, SST, PT, NT, NT/PT y Grasas-Aceites, en el Río Guavio, ocasionado por la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá, bajo diferentes escenarios hidrológicos en el Río Guavio.
- Determinar el cumplimiento de criterios de calidad en el cuerpo de agua receptor.
- Comparar los costos asociados con tasa retributiva en los escenarios analizados.

5. METODOLOGIA

Para el desarrollo del proyecto se tomó como referencia la “Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua”, de la Autoridad Nacional del Agua ANA y del Ministerio de Agricultura y Riego del Perú; la cual se utilizó para establecer el cambio en la concentración de ciertos parámetros en el Río Guavio, debido a la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá. Se aclara que tanto la metodología como la

presentación de resultados responden al orden indicado en la mencionada guía, con sus respectivas adecuaciones al proyecto de que trata esta opción de grado.

Así mismo, se aclara que, para determinar la amplitud de las reacciones, mostrando el comportamiento de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor, se debe hacer un modelo de calidad del agua, sin embargo, no se cuenta con información de calidad siguiendo una misma masa de agua, sino únicamente de datos puntuales en diferentes momentos del tiempo, razón por la cual este proyecto de grado no trata sobre la modelación de los contaminantes en el Río Guavio tras la descarga, sino de la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá sobre el Río Guavio.

Por otro lado, en este trabajo de grado se fue más allá de la guía, estableciendo escenarios con y sin tratamiento, en la actualidad usando datos de monitoreo y en un periodo de diseño de 25 años, con el fin de analizar sus implicaciones tanto a nivel de calidad como de costos, además, se calculó y comparó el cumplimiento de criterios de calidad en el cuerpo de agua receptor y los costos asociados con tasa retributiva en los ocho escenarios.

6. PRINCIPALES REFERENTES TEÓRICOS Y CONCEPTUALES

Aguas Residuales

Según la normatividad colombiana vigente, las aguas residuales se clasifican en dos tipos, domésticas ARD y no domésticas ARnD (MADS, 2015), entendiéndose las primeras como aquellas generadas en viviendas familiares, por lo que provienen de actividades de cocina, baño y limpieza de la vivienda; mientras que las ARnD son todas las demás aguas residuales, que incluyen aguas resultantes de actividades industriales, mineras y demás actividades económicas.

En función de su origen, se pueden establecer criterios de calidad o de contaminación de las aguas residuales, tanto en concentración de constituyentes como en características organolépticas, ya que las ARD al contener sobrantes de comida, heces fecales, grasas, aceites y tensoactivos principalmente, indica que la carga contaminante es de tipo orgánica en su mayoría; mientras que, por ejemplo, las ARnD provenientes de minería, presentan alta carga inorgánica y baja carga orgánica, debido al uso de químicos y lavado de minerales presentes en las rocas (Eco - Intellutions, 2019)

Vertimientos

Los vertimientos a un cuerpo de agua superficial pueden ser directos o indirectos, los directos se realizan mediante una tubería que llega al cuerpo de agua y que puede descargar en una de sus orillas o en el centro de este; mientras que los indirectos se generan por escorrentía de una descarga sobre un suelo impermeabilizado o saturado, por lo que el agua residual llega al cuerpo de agua por acción de la gravedad. Así mismo, los vertimientos pueden contar con estructuras para su entrega al cuerpo de agua superficial o no, conocidas como descoles y cuyo propósito es reducir el impacto físico de la descarga de agua, reduciendo proceso de socavación (Ministerio de Transporte, 2006).

Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales tanto domésticas como no domésticas, consiste en la implementación de una serie de procesos físicos, biológicos y químicos, con el propósito de eliminar o disminuir la concentración de elementos o sustancias contaminantes, presentes en las aguas residuales, antes de realizar su descarga o vertimiento; los mencionados procesos se realizan en unidades de tratamiento que juntas conforma un sistema de tratamiento o planta de tratamiento de aguas residuales PTAR (ACUATECNICA LTDA , 2016).

Impacto Ambiental por Vertimientos

Para determinar el grado de afectación en el Río Guavio producto de la descarga de aguas residuales del casco urbano de Gachetá, es útil utilizar el índice de calidad del agua ICA, el cual es una clasificación en seis categorías que denotan la calidad del agua de un cuerpo de agua superficial, a partir de caracterizaciones de seis parámetros fisicoquímicos, como lo son oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos totales (SST), pH, demanda química de oxígeno (DQO), y conductividad eléctrica (CE) y la relación NT/PT (IDEAM, 2011).

Tasa retributiva

La tasa retributiva es un mecanismo implementado por autoridades ambientales para control de la contaminación, según la cual los usuarios vertedores de aguas residuales deben pagar por la carga contaminante entregada al recurso hídrico de forma directa o indirecta.

Representatividad de los datos

El Río Guavio, siendo un cuerpo de agua superficial de tipo lótico, tiene la característica de la autodepuración, por lo que mediante la dinámica propia de su flujo al descender, interactuando con el aire, las rocas y demás elementos del ecosistema, puede asimilar la contaminación que recibe. Por lo tanto, al tratarse de un río poco contaminado se espera que la concentración de los contaminantes vertidos decrezca (Murgén, 1984).

7. RESULTADOS

Una vez evaluados los ocho escenarios, en los que se contempló el impacto ambiental generado al Río Guavio, por la descarga de aguas residuales del casco urbano del municipio de Gachetá, así como sus implicaciones económicas, se hace evidente que el tratamiento de las aguas antes de hacer su descarga al cuerpo de agua receptor, es de suma importancia, no solo para prevenir el deterioro de la calidad del Río Guavio, sino también para reducir considerablemente los costos asociados con la tasa retributiva, los cuales para una población proyectada en un periodo de diseño de 25 años, llegan hasta los \$ 44.604.813 anuales para una descarga sin vertimientos, mientras que al tratar el agua, dicho costo se reduce a \$ 12.690.656 anuales, lo que significa una reducción del 72%.

En cuanto a calidad, se hace evidente que el vertimiento futuro puede cambiar significativamente la calidad del Río Guavio, pudiendo ser mala en época de estiaje y sin tratamiento y pasando de aceptable a regular en época de lluvia y sin tratamiento. En todos los escenarios con tratamiento se observan las implicaciones del mismo, ya que el cuerpo de agua receptor no ve notablemente afectada su calidad y el costo por tasa retributiva es menor.

Considerando la PTAR contemplada, es importante destacar el tipo de tratamiento, ya que es anaerobio, propio para altas cargas orgánicas que responden a las condiciones del casco urbano y que además requiere de menores costos para operación y mantenimiento. Cabe mencionar que un sistema aerobio demanda grandes cantidades de energía lo que se traduce en elevados costos de operación y mantenimiento de los equipos electromecánicos pudiendo hacer inviable el tratamiento; tal es el caso de la PTAR de la urbanización La Esperanza, cerca al casco urbano del municipio de Gachetá la cual emplea un tratamiento aerobio, pero no se encuentra en funcionamiento debido a que el municipio no la puede mantener.

8. CONCLUSIONES

- ✓ El casco urbano del municipio de Gachetá genera 1,92 L/s de aguas residuales que son vertidas sin tratamiento alguno al Río Guavio en tres puntos de descarga.
- ✓ De acuerdo con las proyecciones a partir de datos obtenidos del DANE, se espera que para el 2045 la población del casco urbano de Gachetá sea de 6.129 habitantes, que podrían llegar a generar hasta 31,35 L/s de aguas residuales de origen doméstico.
- ✓ Para las condiciones del Río Guavio y del vertimiento, encontradas en los monitoreos realizados por CORPOGUAVIO en el año 2019, tanto para época de lluvia como de estiaje, la concentración de los constituyentes aguas abajo del vertimiento no se ven notablemente alteradas debido al bajo caudal de la descarga comparado con el caudal del Río Guavio, por lo que a pesar de que el vertimiento presenta concentraciones elevadas con hasta 549 mg/L de DQO, 222 mg/L de DBO5, 174 mg/L de SST y 88 mg/L de grasas y aceites, datos por encima de los límites establecidos en la norma de vertimientos; por lo que la carga contaminante resultante de multiplicar el caudal por la concentración es baja.
- ✓ Para escenarios futuros, proyectando la población al 2045 a partir de datos obtenidos del DANE, el caudal de la descarga calculado según los lineamientos de la Resolución 0330 de 2017 llegaría a los 31,35 L/s, por lo que, manteniéndose los valores de concentración actuales sin tratamiento, la concentración de los parámetros en el Río Guavio se ven notablemente alterados, aumentando la

DQO desde 17,31 mg/L hasta 36,2 mg/L, la DBO5 pasa de 5,08 mg/L a 15,45 mg/L, SST sube desde 63,72 mg/L hasta 276,22 mg/L y las grasas y aceites pasan de 5,14 mg/L a 7,72 mg/L.

- ✓ En todos los escenarios con tratamiento del vertimiento evaluados, el cambio en la concentración de los parámetros fisicoquímicos pH, CONDUCTIVIDAD, OD, DQO, DBO5, SST, PT, NT, NT/PT y Grasas-Aceites, en el Río Guavio, ocasionado por la descarga de las aguas residuales del municipio de Gachetá es relativamente bajo, pasando de 10,0 mg/L a 17,22 mg/L en DQO, de 2,1 mg/L a 5,58 mg/L de DBO y de 283,0 mg/L a 269,04 mg/l de SST, por lo que no se impacta considerablemente al cuerpo de agua receptor lo cual se ve reflejado el ICA, el cual no se ve modificado por la descarga del municipio de Gachetá.
- ✓ En los ocho escenarios evaluados, el cambio en la concentración de pH en el Río Guavio producto de la descarga de aguas residuales del casco urbano de Gachetá es nulo, mientras que la conductividad en escenarios actuales puede pasar de 50,0 μ S/m a 61,1 μ S/m y en escenarios prospectivos puede llegar a 99,35 μ S/m, lo que representa un aumento del 99%; en cuanto al oxígeno disuelto, este se ve levemente reducido, entre el 0% y el 4% en los diferentes escenarios; La DQO y la DBO pueden verse aumentadas en 325% y 632% respectivamente en el Río Guavio en escenarios prospectivos si no se implementa un tratamiento; sin embargo, la concertación de SST se puede ver levemente reducida, con un 2% después de la descarga, debido a que en el Río Puede presentar altos sólidos en épocas de lluvia, superando la concentración del vertimiento; finalmente, la concentración de grasas y aceites se puede ver elevada en 126% en un escenario prospectivo sin tratamiento, lo que contrasta con un aumento del 24 % al implementar el tratamiento.
- ✓ El cobro por tasa retributiva actualmente puede ascender a los \$ 2.724.490 pesos si se toma como referencia el monitoreo realizado en época de estiaje y a \$ 8.920.770 si se calcula a partir del monitoreo en época de lluvia.
- ✓ Al implementar una planta de tratamiento de aguas residuales, los cobros por tasa retributiva serían de \$ 775.153 pesos o \$ 2.496.978 si los cálculos se hacen con base en los monitoreos de estiaje y lluvias respectivamente.
- ✓ En escenarios futuros, el cobro por tasa retributiva podría ascender a \$ 44.604.813 pesos si no se implementa una planta de tratamiento funcional; mientras que con una PTAR operando lo costos serían de hasta \$ 12.690.656 pesos.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACUATECNICA LTDA . (7 de Julio de 2016). *Tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de acuatecna: <https://acuatecnica.com/tipos-plantas-tratamiento-aguas-residuales/>
- ANA. (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Lima: Perú.
- Eco - Intellutions. (13 de Febrero de 2019). *Tipos de Aguas Residuales, ¿cuántos existen y qué contienen?* Obtenido de ecointellutions: <http://www.ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen#:~:text=El%20agua%20residual%20dom%C3%A9stica%20tambi%C3%A9n,agua%20que%20utilizas%20al%20ba%C3%B1arte>.
- IDEAM. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00)*. Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. 10 p. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Ministerio de Transporte. (2006). *Estudio e Investigación del Estado Actual de las Obras de la Red Nacional de Carreteras (Manual para la inspección visual de estructuras de drenaje)*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Instituto Nacional de Vías.
- Murgen, S. (1984). *Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales*. Ser. Biol. Monogr. 28, OEA: 120 pp.
- SYSCOL Consultores SAS. (2019). *Informe de caracterización de cuerpos hídricos. Gachetá Cundinamarca*. Gachalá Cunidanamarca: Corporación Autónoma Regional del Guavio CORPOGUAVIO.

