



**MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DEL DRENAJE URBANO, EN  
SOFTWARE SWMM, SECTOR NORORIENTAL - SANTA INÉS – TUNJA.**

**MÓNICA YINETH LARA PÉREZ**  
**Ingeniera Civil**

1

---

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL**  
**TUNJA**  
**2020**



**MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DEL DRENAJE URBANO, EN SOFTWARE SWMM, SECTOR NORORIENTAL - SANTA INÉS – TUNJA.**

**MÓNICA YINETH LARA PÉREZ**

**SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN: MANEJO SOSTENIBLE DE MATERIALES Y RECURSOS HIDROAMBIENTALES**

**DIRECTOR: MELQUISEDEC CORTÉS ZAMBRANO**

**PhD Ingeniería y Ciencia de los Materiales**

**Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hídricos e Hidroinformática**

**Ingeniero Civil**

2

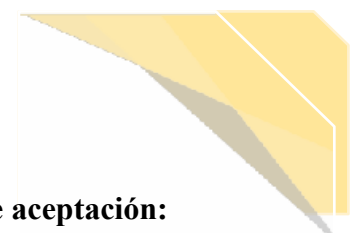
---

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL**

**TUNJA**

**2020**



**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

3

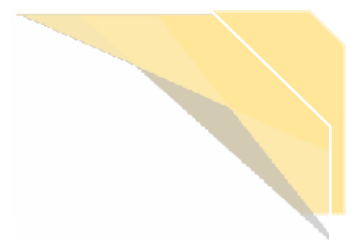
---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Tunja, 13 de Julio del 2020**



## **Dedicatoria**

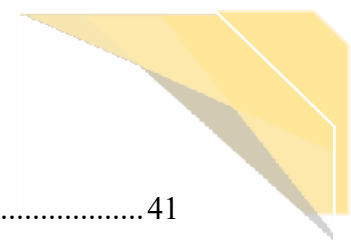
Siempre he tenido en mente luchar por las cosas que sueño, culmino uno de ellos agradeciendo a las personas que me han dado las mejores enseñanzas en la vida, Omaidá y Germán.

Y a quienes, durante este proceso me enseñaron que no hay mayor fortaleza que el amor, y que sin importar lugar o distancia permanecen intactos en mi corazón, a mis más lindos ángeles, Gladys y Manuel.

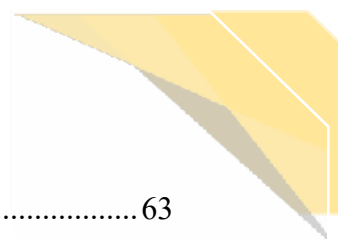


## CONTENIDO

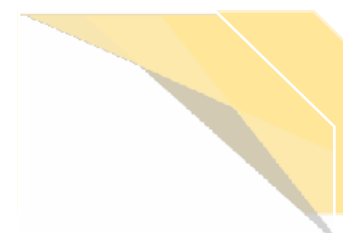
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
OBJETIVOS.....	20
1. ESTADO DEL ARTE .....	21
1.1. Problema de Calidad de las Aguas Receptoras en Caso de Vertidos desde Colectores Unitarios .....	24
1.1.1. Parámetros de Calidad del Agua a Considerar .....	25
1.1.2. Procesos a Considerar en el Estudio de Vertidos en Tiempo de Lluvia.....	27
1.1.3. Objetivos de Calidad. Estándares de Calidad en el Medio Receptor .....	30
1.1.4. Estrategias de Solución del Problema .....	31
1.1.5. Consideraciones Finales .....	32
1.2. Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios .....	33
1.2.1. Antecedentes.....	33
1.2.2. Conceptos Fundamentales de Descarga de Sistemas Unitarios.....	33
1.2.3. Caracterización de las Cuencas .....	34
1.2.4. Objetivos y Metodología del Trabajo.....	35
1.2.5. Evolución Temporal de la Campaña de Muestreo. Incidencias .....	36
1.2.6. Síntesis de Resultados .....	37
2. MARCO TEÓRICO .....	38
2.1. Alcantarillado .....	38
2.1.1. Sistemas de Alcantarillados.....	38
2.2. Contaminantes .....	39
2.2.1. Parámetros Indicadores de Contaminación. ....	40



2.3.	Modelización.....	41
2.4.	Calibración.....	41
2.5.	Validación.....	42
2.6.	SWMM (Storm Water Management Model).....	42
2.6.1.	Características del Modelo Hidrológico.....	43
2.6.2.	Características del Modelo de Calidad.....	44
2.6.3.	Uso del Suelo.....	45
3.	METODOLOGÍA.....	47
3.1.	Descripción Zona de Estudio.....	47
3.1.1.	Descripción Local (Gerencia de Planeacion y Construcciones, 2017):.....	48
3.1.2.	Distritos de Drenaje Zona Nor- Oriental.....	49
3.1.3.	Base Topológica Red de Drenaje Distrito Santa Inés.....	49
3.2.	Toma de Muestras (Ministerio de Ambiente y Agua, 2015).....	52
3.2.1.	Lugar.....	52
3.2.2.	Tiempo.....	52
3.2.3.	Frecuencia.....	53
3.3.	Análisis de Muestras.....	54
3.4.	Modelación en EPA – SWMM.....	56
3.4.1.	Escorrentía Posterior al Desarrollo.....	56
3.4.2.	Hidráulica de Drenaje en Superficie.....	57
3.4.3.	Calidad del Agua de Escorrentía.....	57
3.5.	Sulfuro de Hidrogeno.....	60
3.5.1.	Caracterización Hidráulica.....	60
3.5.2.	Caracterización de las Aguas Residuales.....	61
3.5.3.	Predicción de Sulfuro.....	62



3.5.4.	Ecuaciones Predictivas .....	63
3.5.5.	Indicadores de Generación de Sulfuros.....	64
3.5.6.	Formula Z .....	64
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
4.1.	Configuración del Modelo.....	66
4.1.1.	Definición del contaminante.....	66
4.1.2.	Uso de las Tierra.....	74
4.2.	Generación de Sulfuro .....	81
4.2.1.	Influencia del Oxígeno en la Generación de Sulfuros.....	89
3.5.8	Inyección de Aire en Tuberías de Impulsión.....	90
3.5.9.	Aireación en Tuberías de Gravedad. ....	90
4.3.	Normativa Vigente – Resolución 0631 – 2015. ....	90
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
	REFERENCIAS .....	93



## RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Alternativas de Tratamiento de Agua Residual de. Tunja.....	18
Tabla 2. Análisis Granulométrico del Material de Escorrentía. ....	28
Tabla 3. Intensidades y Duraciones de Lluvia para Limpieza de Contaminantes de las Calles .....	29
Tabla 4. Estándares de Calidad del Río, Basados en Percentiles .....	30
Tabla 5. Horario Establecido para la Toma de Muestras del Periodo Seco. ....	53
Tabla 6. Requerimientos para Preservación y Almacenamiento de Muestras de Agua .....	54
Tabla 7. Ejemplo de Datos de Correlación.....	63
Tabla 8. Interpretación Valores de Z .....	65
Tabla 9. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3955.....	66
Tabla 10. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 3955 .....	67
Tabla 11. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3910.....	69
Tabla 12. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 3910. ....	69
Tabla 13. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 4091.....	71
Tabla 14. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 4091. ....	72
Tabla 15. Evento de Lluvia Implementado en el Modelo. ....	74
Tabla 16. Parámetros Determinados para la Subcuenca.....	75
Tabla 17. Porcentaje Área - Uso de Suelo.....	75
Tabla 18. Evaporación Media Total Mensual Multianual de la Estación Climatológica UPTC .....	76
Tabla 19. Probabilidad de Producción de Sulfuro de Hidrogeno .....	86
Tabla 20. Valores Máximos Permisibles en los Vertimientos de Aguas Residuales .....	91



## RELACIÓN DE GRAFICAS

Grafica 1. Resultados pH en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. ....	67
Grafica 2. Resultados Temperatura en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. .....	68
Grafica 3. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.....	68
Grafica 4. Resultados pH en el Punto 3910 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. ....	70
Grafica 5. Resultados Temperatura en el Punto 3910 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. .....	70
Grafica 6. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 3910 Periodo Seco y Periodo de Lluvia.....	71
Grafica 7. Resultados pH en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. ....	72
Grafica 8. Resultados Temperatura en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia. .....	73
Grafica 9. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.....	73



## RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Localización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Tunja .....	18
Figura 2. Mapa Tunja - Boyacá .....	19
Figura 3. Localización General .....	47
Figura 4. Distritos de drenaje Zona Nororiental.....	49
Figura 5. Cuenca Urbana Delimitada Red de Drenaje Santa Inés.....	50
Figura 6. Elección Puntos Toma de Muestras .....	50
Figura 7. Punto #1. PATP 3955.....	51
Figura 8. Punto #2. PATP 3910.....	51
Figura 9. Punto #3. PATP 4091.....	51
Figura 10. Metodología Análisis de Muestras de Agua. ....	52
Figura 11. Frecuencia de la Toma de Muestras.....	53
Figura 12. Formato de Registro de Toma de Muestras. ....	54
Figura 13. Formulación de Acumulación en Superficies .....	58
Figura 14. Comparación de las Concentraciones de Sulfuros Totales y Disueltos en los Alcantarillados.....	61
Figura 15. Datos de Correlación de Sulfuros Totales.....	63
Figura 16. Toma de muestra en el Punto #1. PATP 3955 en Periodo Seco. ....	66
Figura 17. Toma de muestra en el Punto #1. PATP 3955 en Periodo de Lluvia.....	66
Figura 18. Toma de muestra en el Punto #2. PATP 3910 en Periodo Seco. ....	69
Figura 19. Toma de muestra en el Punto #2. PATP 3910 en Periodo de Lluvia.....	69
Figura 20. Toma de muestra en el Punto #3. PATP 4091 en Periodo Seco. ....	71
Figura 21. Toma de muestra en el Punto #3. PATP 4091 en Periodo de Lluvia.....	71
Figura 22. Definición de Contaminantes en Modelo SWMM.....	74
Figura 23. % de Impermeabilidad .....	74
Figura 24. Escorrentía.....	76
Figura 25. Calidad de la Escorrentía en la Zona de Estudio.....	77
Figura 26. Enrutamiento de Calidad.....	77
Figura 27. Comportamiento DBO5 y Caudal Total en un Evento de Lluvia .....	78

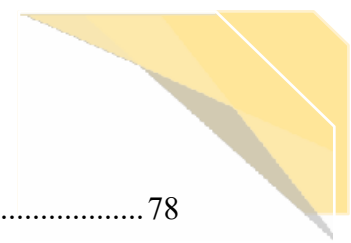


Figura 28. Comportamiento DQO y Caudal Total en un Evento de Lluvia..... 78

Figura 29. Comportamiento Cloruros y Caudal Total en un Evento de Lluvia..... 79

Figura 30. Comportamiento SST y Caudal Total en un Evento de Lluvia..... 79

Figura 31. Comportamiento Sulfatos y Caudal Total en un Evento de Lluvia ..... 80

Figura 32. Comportamiento Sulfuros y Caudal Total en un Evento de Lluvia ..... 80

Figura 33. Comparación de los Contaminantes Evaluados en un Evento de Lluvia..... 81

Figura 34. Resumen de los Contaminantes en el Tramo PATLAL4741 para eDBO<sub>5</sub> ..... 82

Figura 35. Resumen del Flujo en el Nodo PATP4014 para eDBO<sub>5</sub>..... 82

Figura 36. Datos Nodo de Entrada PATP 4013 del Tramo PATLP 4741 para S..... 82

Figura 37. Datos Nodo de Salida PATP 4014 del Tramo PATLP 4741 para S ..... 83

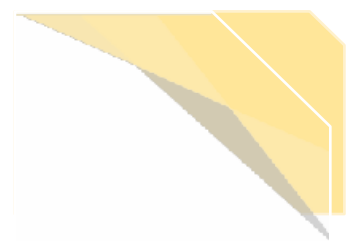
Figura 38. Resumen de Características en el Nodo PATP4014 para S ..... 83

Figura 39. Resumen del Flujo en el Tramo PATLAL4741 para Q ..... 83

Figura 40. Resumen del Flujo en el Tramo PATLAL4741 para P y b..... 84

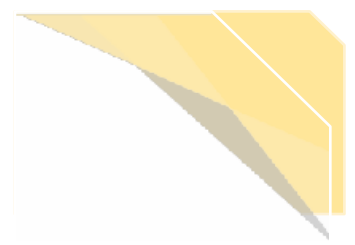
Figura 41. Relación Geométrica de los Conductos para el Tramo PATLAL 4741 para P y b  
 ..... 84

Figura 42. Resumen de Características en el Nodo PATP4014 para P ..... 85



## RELACIÓN DE ECUACIONES

Ecuación 1. Proceso de Lavado y Arrastre de Materiales .....	29
Ecuación 2. Carga Contaminante .....	29
Ecuación 3. Formula de Manning.....	60
Ecuación 4. Generacion de Sulfuros.....	65
Ecuación 5. DBO5 eficiente. ....	82
Ecuación 6. Pendiente.....	83
Ecuación 7. Caudal .....	84
Ecuación 8. Perimetro Mojado .....	85
Ecuación 9. Ancho de la Superficie.....	85
Ecuación 10. Area Efectiva .....	85
Ecuación 11. Ecuacion Pomeroy .....	86



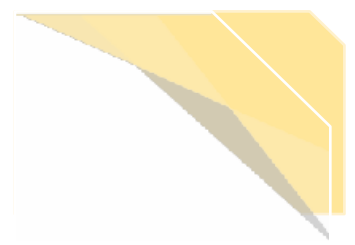
## **RESUMEN**

Las aguas residuales son aguas usadas y sólidos que por un medio u otro se introducen en las cloacas y son transportados mediante el sistema de alcantarillado (Romero Rojas, 2004). Normalmente los lugares que cuentan con un sistema de suministro de agua, requieren una medida de evacuación, lo que se conoce como sistema de alcantarillado.

Estos son un conjunto de estructuras destinadas a recibir, evacuar, conducir y disponer las aguas servidas; fruto de las actividades humanas, o las que provienen como fruto de la precipitación pluvial, de acuerdo a su procedencia se distinguen en sanitario, pluvial y combinado (Perez Carmona, 2013).

En la presente investigación se llevó a cabo un análisis del agua midiendo la concentración de contaminantes que se entrega a los colectores de la zona nororiental de Tunja, para hacer una comparación con el agua entrante a la Planta de Tratamiento de Aguas Residual, (PTAR), realizando la modelación en el programa SWMM, y así analizar el comportamiento que tiene la red troncal del alcantarillado de esta zona. Se busca observar el efecto de la precipitación sobre los contaminantes y si las condiciones con las que se encuentra la tubería producen algún efecto sobre la calidad del agua en la red de esta zona.

Palabras Clave: Alcantarillado, Calidad de Agua, Modelación, SWMM.



## **ABSTRACT**

Wastewater is used water and solids which in one way or another end up in the sewers and transported through the sewerage system (Romero Rojas, 2004). Normally places with a water supply system require a measure of evacuation, which is known as a sewage system.

These are a set of structures designed to receive, evacuate, drive and dispose of wastewater. Due to human activities, or the ones that come as a result of rainfall, according to their origin are distinguished in sanitary, rainwater and combined (Perez Carmona, 2013).

The present research seeks to design a hydrodynamic model of urban drainage quality in the north-eastern Tunja area - Santa Inés district calibrated and validated to perform a water analysis by measuring the concentration of pollutants that are delivered from the collectors of the north-eastern area of Tunja to the sources of dumping, taking into account the current legal regulations. Performing the modeling in the SWMM program, in order to analyze the behavior in the backbone of the sewer of this area. The aim is to observe the effect of precipitation on pollutants and whether the conditions where the pipe is located have any effect on the water quality in the network of this area.

Keywords: Sewerage, Water Quality, Modeling, SWMM



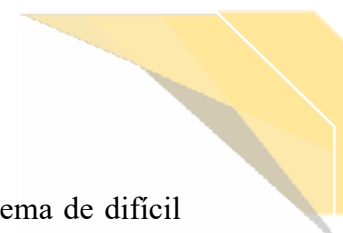
## INTRODUCCIÓN

Actualmente la ciudad de Tunja, ha presentado un fenómeno de ocupación o alteración de cauces naturales de aguas lluvia o de escorrentía que conducen dichos flujos a los cuerpos receptores causando una repercusión en el drenaje al no respetarse la hidrología de las cuencas naturales afectando la capacidad de drenaje de las mismas. Además de esto presenta un considerable y acelerado desarrollo urbano en la parte nororiental, generando una preocupación debido a esto y a los continuos cambios de las superficies de drenaje que permiten la infiltración por zonas duras e impermeables, causando reboses e inundaciones, afectando a la ciudadanía y en una ciudad en proceso de crecimiento y transición de sus redes de acueducto y alcantarillado, se hace necesario conocer el comportamiento operativo del sistema. Conocer el funcionamiento hidráulico de las redes en tiempo real es un instrumento de vital importancia para identificar áreas de conflicto, vulnerabilidades y riesgos; además, con ello es posible plantear medidas de prevención, dictar alternativas de solución, optimizar el funcionamiento del sistema de drenaje urbano, prevenir daños y problemas en las estructuras, priorizar recursos, cumplir metas contractuales y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos (Gerencia de Planeación y Construcciones, 2017).

15

---

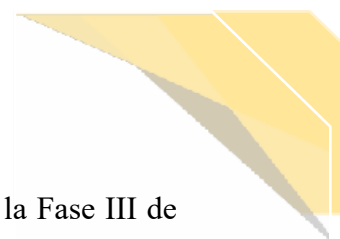
El sobredimensionamiento de los elementos de un sistema unitario urbano de alcantarillado, si bien permite el transporte de caudales captados de la escorrentía pluvial, aporta un importante potencial de sedimentación de sólidos propios de las aguas residuales durante los periodos secos. Esto se debe a que las velocidades de escurrimiento son, en muchos casos, inadecuadas para mantenerlos en suspensión. Como consecuencia de ello, durante periodos sin lluvias, los conductos actúan como depósitos para estos sedimentos (Seco I., 2016). En el pasado existió la tendencia a no considerar aspectos de calidad del agua en el diseño y operación de sistemas de drenaje. Esta tendencia permanece en el desarrollo de la mayoría de proyectos. Las redes de alcantarillado se diseñan tradicionalmente para desarrollar una función de recolección y transporte, mientras que una Planta de Tratamiento de Agua Residuales “PTAR” se diseña para remover o reducir contaminantes a un nivel aceptable (Rodríguez J. P., 2005).



La gestión de la contaminación asociada a la escorrentía urbana es un problema de difícil solución, sobre todo si se tiene en cuenta la naturaleza estocástica de las lluvias y los regímenes hidrológicos particulares de algunos ríos (Obermann, Rosenwinkel, & Torunoud, 2009). Los cauces naturales de algunas regiones presentan caudales cuyas diferencias estacionales son significativas, lo que los hace más sensibles a los vertidos desde sistemas unitarios en épocas en las que el caudal de agua aportado por los aliviaderos puede ser del mismo orden o mayor que el caudal circulante. La evaluación de la calidad de las aguas pluviales urbanas es de gran importancia para el enfoque actual de las gestiones integradas de drenaje urbano. Las características de un agua residual pueden hacerse de distintas maneras dependiendo del propósito específico. Un programa de muestreo para caracterización y control de calidad de aguas supone un análisis cuidadoso del tipo de muestras, número de ellas y parámetros que se deben estudiar (Romero Rojas, 2004).

El análisis de la calidad del agua, está soportado en las mediciones que se realizan desde la Red del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales “IDEAM” y en la información de sectores económicos que recolectan datos de calidad del agua de manera sistemática, representados y especializados en indicadores de calidad del agua y de amenaza potencial por contaminación.

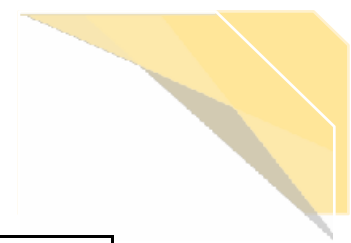
La demanda biológica de oxígeno “DBO” vertido a los sistemas hídricos después de tratamiento en Colombia durante el año 2012 alcanzó 756.945 t/año. De este total, la industria aporta el 28%, el sector doméstico el 69% y el sector cafetero el 3%. La carga total de la demanda química de oxígeno “DQO”, después de tratamiento, es de 1.675.616 t/año, de los cuales la industria aporta el 37%, el sector doméstico el 61% y el cafetero el 2%. En cuanto a Sólidos Suspendedos Totales “SST” se vierten 1.135.726 t/año. La industrial aporta el 7%, el sector doméstico el 91% y el subsector cafetero el 1%. En 179 municipios ubicados en 15 departamentos se estimó una carga vertida en 2012 de 205 toneladas de mercurio al suelo y agua, de las cuales 27.5% corresponden al uso para beneficio de la plata y 72.5% al beneficio de oro (Sistema de Información Ambiental de Colombia, s.f.).



El diseño y la construcción de PTAR de la ciudad de Tunja, surgieron como la Fase III de un Plan Maestro de Alcantarillado hecho en 1999 que tenía como finalidad el “Saneamiento Hídrico de los Ríos Jordán y La Vega”. Buscando el uso de tecnologías apropiadas para manejar el tema de contaminación hídrica en la ciudad de Tunja, teniendo en cuenta factores como: Crecimiento urbanístico de la ciudad, desarrollo no controlado de redes, falta de asesoría técnica para el trazado de redes, entre otros.

Actualmente la PTAR de Tunja se compone de tres módulos independientes, cada uno de ellos está diseñado para tratar un caudal de 120 l/s. El proceso realizado en la PTAR es de tipo biológico, comprende un tren mixto anaerobio-aerobio de bajo consumo energético y alta eficiencia de remoción, adicionalmente muy baja producción de lodo por la alta edad de los mismos. Está localizada en el norte de la ciudad de Tunja, en la vía que conduce a Oicatá y recibe las aguas residuales de todo el alcantarillado municipal (ya sea combinado o separado). Su construcción empezó en el año 2006 y la construcción de tres módulos duró aproximadamente 10 años. En el marco del plan maestro se tuvieron las siguientes fases: “Identificación y caracterización de vertimientos”, “Diseño de estructuras colectoras, interceptoras y separadoras” y "Pre diseño de las alternativas de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Tunja” (Alcaldía Mayor de Tunja, 2018).

La funcionalidad de la PTAR queda establecida en la conversión de un alcantarillado especialmente combinado a un sistema sanitario afluente a la estructura interceptora y mantenimiento de los ríos Jordán y La Vega en función de la separación y descarga de los aportes fluviales. El nivel de complejidad de la PTAR estableció la consideración de las áreas a desarrollar en Tunja como zonas de futura densificación urbana. Las tecnologías de tratamiento seleccionadas satisfacen condiciones de eficiencia de remoción de carga contaminante superior al 85% (Gerencia de Planeación y Construcciones, 2017).



**Tabla 1. Alternativas de Tratamiento de Agua Residual de. Tunja.**

Tratamiento	Alternativa 1 Aireación Extendida	Alternativa 2 Aireación Extendida + UASB
Tratamiento Preliminar	Rejilla Auto Limpiante Desarenador Canaleta Parshall	Rejilla Auto Limpiante Desarenador Canaleta Parshall
Tratamiento Secundario	Tanque de Aireación Extendida Sedimentación Cloración	Reactor UASB Tanque de Aireación Extendida Sedimentación Cloración
Tratamiento de Lodos	Pozo de Recirculación de Lodos. Espesador de Lodos Deshidratador Centrifugo	Pozo de Recirculación de Lodos Espesador de Lodos Deshidratador Centrifugo.

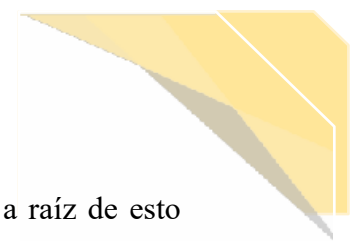
Fuente: Plan Maestro de Alcantarillado, Tunja E.S.P, S.A.

**Figura 1. Localización Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Tunja**



Fuente: Adaptación propia con imágenes de Google Maps., octubre de 2017.

Se identificaron las descargas del alcantarillado, incluyendo la medición de los caudales y la identificación de la concentración y existencia de contaminantes en el agua, esto en vertimientos de los ríos Jordán y la Vega. En primer lugar, se encontraron 145 descargas, pero se descargaron 33 por ser de aguas lluvias o estar sin servicio (Gerencia de Planeación y Construcciones, 2017). Es importante conocer dónde y cómo se incorporan los caudales a la red para poder analizar su comportamiento hidráulico, por esto en convenio con la empresa Proactiva S.A, se realizara una medición y modelación de contaminantes presentes en el agua como: DBO, DQO, Plomo, SST y Nitrógeno, con esto se busca mejorar el drenaje pluvial para evitar consecuencias económicas, ambientales y de salud pública, al llegarse a presentar una contaminación debido a un vertimiento en alguno de los cuerpos



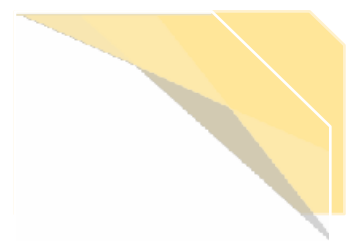
hídricos cercanos a la red, dado que el impacto ambiental que se generaría a raíz de esto sería potencialmente alto y el tratamiento para su descontaminación sería un proceso largo que conlleva una serie de tratamientos en ocasiones con un costo económico alto (Gerencia de Planeación y Construcciones, 2017).

SWMM (Storm Water Management Model), es un modelo de simulación que ha introducido módulos que permiten predecir la evolución de los parámetros de calidad durante un evento de tormenta, pero considerando solo la acumulación y lavado de contaminantes depositados en las superficies de las cuencas de aporte, sin contemplar la influencia de la sedimentación de particular dentro de las conducciones (Gironas, Rossman, & Davis, 2009). En cambio, los modelos desarrollados por HydroWorks (Infoworks) y Mouse Trap (Mike Urban), requieren la definición real de numerosos parámetros de calidad para una obtención de resultados confiables. La falta de información de campo, hace que se termine utilizando valores que se presentan por defecto, sin un conocimiento adecuado de su influencia. La incertidumbre por lo tanto dificulta el uso de estos programas (Seco I. , 2016).

**Figura 2. Mapa Tunja - Boyacá**



**Fuente:** El debate Boyacense., octubre de 2017.



## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un modelo hidrodinámico de calidad de drenaje urbano del sector Nororiental de Tunja – Barrio Santa Inés, calibrado y validado a través del software SWMM 5.1.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las aguas residuales en periodos seco y de lluvia de la red de alcantarillado de la zona Nororiental – Barrio Santa Inés de Tunja.
- Analizar el comportamiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas medidas a lo largo de la red de alcantarillado de la zona Nororiental – Barrio Santa Inés de Tunja.
- Analizar y evaluar el cumplimiento de la normatividad de vertimientos vigente en Colombia (Resolución 0631 de 2015) de acuerdo con la caracterización obtenida de la descarga del sector de alcantarillado.



## 1. ESTADO DEL ARTE

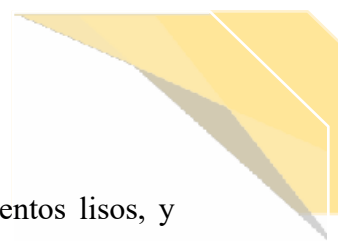
Para algunos parámetros, es posible establecer rangos de variación y valores promedio para aguas procedentes de la escorrentía superficial. Generalmente la escorrentía es generada por las precipitaciones, y contribuye a que las aguas residuales se mezclen con grandes volúmenes de agua de mejor calidad. Debido a los grandes sucesos de lluvias, áreas de drenaje, características del agua residual, las características de las aguas residuales mezcladas suelen variar altamente en distintos lugares (Tejero & Temprano, 1993).

El hidrograma de escorrentía de la lluvia en una cuenca rural presenta diferencias respecto a una cuenca urbana con las mismas características, en la primera la duración es mayor y el caudal punta es menor en diferentes tiempos, debido al distinto grado de permeabilidad. Además de esto por los fuertes caudales punta en periodos de tiempo cortos conduce a que los sistemas de drenaje sean de gran tamaño, y para el exceso de escorrentía de agua pluvial es necesario su almacenamiento en un suelo urbano previo a la entrada principal del sistema (Sharon, 1989).

21

La limpieza de las calles se ha considerado uno de los aspectos más importantes para mejorar la calidad de la escorrentía urbana, debido a que el tamaño de las partículas presentes en las calles que suelen ser limpiadas por los sistemas habituales tiene un tamaño entre 75µm y los 3000µm. Las investigaciones realizadas por la agencia de protección del medio ambiente muestran una mejoría de la calidad de las aguas de escorrentía urbana como consecuencia del barrido de las calles. Las conclusiones de estudios realizados en Milwaukee y en Champaign, ciudades estadounidenses en 1982, muestran eficiencia en cuanto a la eliminación de sólidos suspendidos totales entre un 30 y 40% y 90% de metales pesados (Valiron & Tabuchi, 1992).

En San José, California se evaluó que en las calles con superficies lisas en las que se realizaba un barrido 1 a 2 veces al día, era posible eliminar hasta el 50% de los sólidos totales y metales pesados de la escorrentía urbana. Así se observó que este método es un



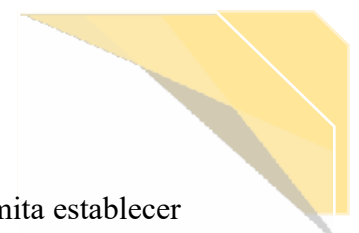
medio efectivo para controlar la calidad de la escorrentía urbana en pavimentos lisos, y cuando la frecuencia de este barrido disminuye de 1 a 2 veces en el mes, el rendimiento baja hasta el 5% (Huber & RE., 1988).

(Arenas, 2004) Realizó una investigación, debido a la falta de datos acerca de la calidad del agua y la capacidad de asimilación de cargas contaminantes en los ríos de montaña, ya que los principales estudios que se han realizado son en ríos de valle o planicie. Para llevarla a cabo manejó una versión simplificada de la metodología planteada por Camacho y Díaz Granados, teniendo en cuenta el modelo QUAL2K.

Debido a distintos factores, como condiciones hidrológicas y manejo de precisión del cronograma de toma de muestras, la metodología planteada generó unos resultados a los cuales se les deben realizar las correcciones necesarias para evitar inconvenientes con su ejecución. Se concluyó que el modelo tiene la capacidad de modelar adecuadamente ríos de montaña a pesar que su objetivo principal son los ríos de planicie, sin reducir el nivel de precisión de la modelación, constituyendo así una herramienta para la mejora y planeación del saneamiento de los recursos hídricos en el país (Arenas, 2004).

(Rodríguez J. P., 2005) realizó un proyecto que buscaba generar un modelo dinámico para conocer la calidad del agua al final del interceptor Fucha – Tunjuelo – Canoas. Este consistía en implementar dos plantas de tratamiento de aguas residuales, en el Salitre y en la Sabana, con un interceptor de aguas residuales que capte los aportes de las cuencas de Fucha, Tunjuelo, Tintal y Soacha y las lleve hasta la PTAR Canoas, evaluando así el comportamiento de contaminantes como: Nitratos, Amonio, DBO, Oxígeno Disuelto.

La investigación no hizo énfasis en las transformaciones y reducciones que sufre la carga contaminante a través de un tramo de alcantarillado, ya que los tiempos de residencia no son suficientes para que los procesos sean significativos y resalta la importancia de realizar un modelo dinámico de calidad de agua para poder así establecer las políticas de operación de la PTAR.



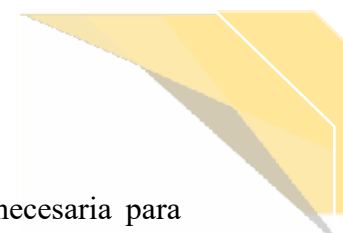
Se resalta la importancia de un modelo dinámico de calidad de agua, que permita establecer políticas de operación de la PTAR y de las estaciones de elevación a partir de unas características aguas arriba con un continuo monitoreo. Aunque los resultados del modelo se deben considerar como preliminares debido a que no es posible contar con datos de campo que permita su calibración. Sin embargo, los datos de entrada empleados en la modelación permiten considerar los resultados adecuados para una idea aproximada (Rodríguez J. P., 2005).

(Rodríguez N. , 2014) realizó una modelación integrada de la calidad del agua del río Bogotá y el sistema de drenaje urbano de la ciudad de Bogotá, debido a que el sistema de drenaje urbano cuenta con un gran número de conexiones erradas. El sistema solo cuenta con una PTAR en la desembocadura del Río Salitre, con esto Bogotá y los municipios ubicados en la cuenca baja del río Bogotá afrontaban un riesgo considerable en la salud pública de sus habitantes.

El modelo se desarrolló en Matlab por medio del acople, modificación e implementación de los modelos City Drain y AMQQ, contando con una herramienta de visualización de resultados desarrollada en Microsoft Excel, para así facilitar el acceso de los diferentes entes que toman decisiones en la herramienta. El modelo se ejecutó con el propósito de estimar la incertidumbre asociada con los resultados de este.

Presentaron dos escenarios hipotéticos, resaltando que estos no representan con exactitud las opciones del tratamiento evaluados por la ciudad de Bogotá. El modelo no solo permitió evaluar opciones de tratamiento, sino también de implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible. Los resultados de cantidad del agua son válidos, pero deben analizarse con cautela, debido a que el modelo aun no representa de forma adecuada el fenómeno de lavado de contaminantes en la superficie de la ciudad en eventos de precipitación (Rodríguez N. , 2014).

En hidráulica, la modelación es usada para simular situaciones reales a las que se desee saber su comportamiento, ya que el modelo y el prototipo van siempre de la mano, el



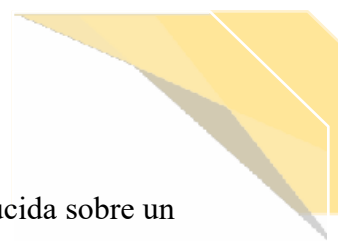
estudio del modelo y las observaciones de este, constituyen información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo. Estos modelos tienen múltiples aplicaciones, como la solución de problemas relacionados con estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración o tramos de ríos con o sin transporte de sedimentos. En ríos estos modelos son usados para resolver problemas de regulación de ríos o desarrollos hidroenergéticos, determinar el tiempo de desplazamiento de ondas de inundación (Biblioteca UDEP, 2008).

Para casos de agua potable también se han realizado investigaciones en este ámbito; (Cortes, 2007), desarrollo un módulo de simulación de la calidad de agua en un periodo dinámico, implementado en Delphi 6.0 para el programa Redes, desarrollado en el centro de investigaciones de Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes. Los resultados al correr la simulación de calidad en varias redes de distribución se validaron con EPANET y con mediciones de campo de concentraciones de cloro realizadas sobre redes. Este módulo de simulación de calidad de agua en un periodo dinámico conserva las características de velocidad presentes en algoritmos desarrollados en otros programas. La aplicación de esta investigación ofrece mayor flexibilidad al uso y necesidades de cada tipo de usuario de programas de modelación de redes de distribución de agua potable (Cortes, 2007).

A continuación, se presentan dos estudios realizados en España, en donde se relaciona la importancia de la calidad del agua del alcantarillado para evitar contaminación en los medios receptores. El primero es realizado por el ingeniero (Gomez, 2007), perteneciente al grupo Flumen del departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental de la universidad de Catalunya en Barcelona.

### **1.1. Problema de Calidad de las Aguas Receptoras en Caso de Vertidos desde Colectores Unitarios**

“Presento estudios relacionados con el drenaje urbano centrándose en la problemática de la cantidad de agua caída sobre una cuenca urbana, debido a las inundaciones asociadas a esto y la incapacidad de desagüe de una red y en los últimos años se ha sumado a lo anterior la



calidad del agua de escorrentía, con carga contaminante no despreciable producida sobre un medio urbano y los problemas que lleva realizar su vertido a un medio natural; este fenómeno se conoce con las siglas CSO (Combined Sewer Overflows), vertidos procedentes de una red de alcantarillado unitario en tiempo de lluvia. Cuando una lluvia media, provoca un caudal ligeramente superior a la capacidad de la planta de tratamiento, se genera el mayor peligro debido a que con una lluvia intensa el grado de dilución de la descarga al medio receptor es mucho menor, por ende, las concentraciones de material contaminante son más elevadas y potencialmente más peligrosas.

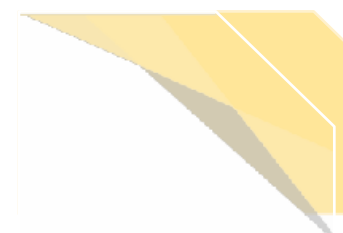
Observando que la mayor carga contaminante se asociaba a los primeros minutos de lluvia. Ocasionando que los primeros caudales son los encargados de transportar las concentraciones que serán más altas que los caudales máximos debido al gran volumen de agua que circula y produce una mayor dilución de las sustancias que transporta.

Argumentando así que el análisis de cantidad y calidad del agua de escorrentía, debe ser verificado de forma experimental y que al realizar un vertido procedente de una red de alcantarillado en un río de bajo caudal presentaría inconveniente al no poder diluir los efectos de este vertido, el régimen hidráulico de circulación del río ocasiona que la carga contaminante evolucione, debido al transporte. Si aguas abajo existen usos recreativos o de abastecimiento para el agua del río es necesario predecir las consecuencias de este vertido, evaluando las variaciones en tiempo y espacio de la concentración de cargas contaminantes, verificando los límites admisibles para cada uso” (Gomez, 2007).

En su estudio determinaron:

#### 1.1.1. Parámetros de Calidad del Agua a Considerar

Existen varias sustancias que pueden producir cambios en las especies y cuando estos se consideran inaceptables, el material que genera esta alteración se le conoce como contaminante, y la cantidad de esta materia en el agua es un índice de calidad de la misma. Estas sustancias se clasifican de acuerdo a su origen, actividad, etc. Entre las más habituales se encuentran (Gomez, 2007):



#### 1.1.1.1 Sedimentos

Su presencia en el agua de escorrentía depende de la materia sólida erosionable de la cuenca, una gran cantidad de estos produce una mayor turbiedad en el agua, acumulación en el fondo limitando la zona de animales acuáticos, colmatación de las agallas de los peces, alteración en la cadena alimenticia del medio acuático, acumulación física de masas de sedimentos cubriendo zonas y alterando la estética de este medio. La acumulación física de esta se determina a partir de parámetros como: sólidos en suspensión, sólidos volátiles y no volátiles, turbiedad y sólidos sedimentables (Gomez, 2007).

#### 1.1.1.2. Sustancias con Demanda de Oxígeno

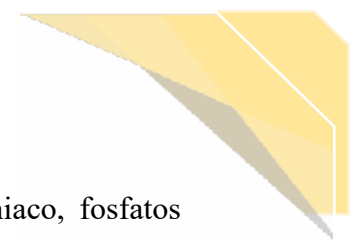
El oxígeno disuelto en el agua, necesario para la vida acuática, es consumido por las reacciones de oxidación de la materia orgánica derivada de algunas actividades biológicas o químicas. Este se repone por medio de la atmósfera o de la producción de algas y vegetales acuáticos. El problema surge cuando la producción o aporte no alcanza a compensar su consumo en las reacciones de oxidación y las consecuencias de esto es la reducción de niveles de oxígeno por debajo de los umbrales de supervivencia de las especies animales. Se estima directamente mediante la medida de oxígeno disuelto “OD”, DBO, DQO o el carbono orgánico total (COT) (Gomez, 2007).

#### 1.1.1.3. Indicadores Biológicos

El agua de escorrentía puede contener cantidades importantes de coliformes fecales o totales, organismos patógenos como la shigella, salmonella o el clostridium, siendo los responsables de la alteración de salud en humanos y animales. También se pueden encontrar la vibrio comma (cólera), salmonella typhosa, que generan problemas de salud más serios y con la posibilidad de generar epidemias (Gomez, 2007).

#### 1.1.1.4. Nutrientes

Son sustancias químicas como el nitrógeno, carbono y fósforo que estimulan el crecimiento de algas y plantas acuáticas. Este crecimiento puede aumentar el consumo de oxígeno durante la respiración nocturna, reduciendo el oxígeno disuelto en el agua por las noches, el aumento de algas en la superficie, generación de malos olores y coloración del agua. Se



evalúa el contenido de nitrógeno total, nitrógeno orgánico, nitratos, amoníaco, fosfatos totales, u otras medidas indirectas (Gomez, 2007).

#### 1.1.1.5. Metales Pesados

Se encuentran presentes casi siempre en el agua de escorrentía, estos pueden causar daños incluso letales si se encuentran por encima de las concentraciones admisibles. Los metales controlados habitualmente son: arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, hierro, manganeso, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, y zinc. Otras sustancias tóxicas: Algunos de estos pueden aparecer en el agua, resultado de un vertido tóxico como lo son: los ftalatos, compuestos plásticos, fenoles y cresoles, empleados en la conservación de la madera, pesticidas o herbicidas, aceites y grasas, metales, etc (Gomez, 2007).

### 1.1.2. Procesos a Considerar en el Estudio de Vertidos en Tiempo de Lluvia

#### 1.1.2.1. Acumulación de Contaminantes

Se produce a lo largo de los días anteriores a un suceso de lluvia, o incluso durante sucesos de lluvia muy ligera que generan poca a nula escorrentía. Este se denomina buildup. Intensidades menores de 0.013 mm/h no interrumpen el proceso de acumulación, esta se debe a diferentes fuentes de contaminación (Gomez, 2007).

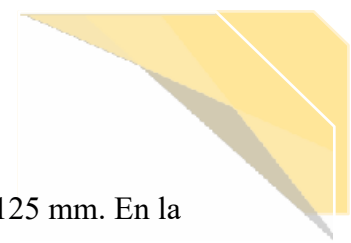
27

#### 1.1.2.2. Fuentes de Contaminación en Zona Urbana

Elementos que forman una capa de suciedad en calles y parques, donde se acumulan distintos residuos como:

- Restos orgánicos de vegetales y animales domésticos.
- Residuos tóxicos procedentes de emisiones de vehículos.
- Restos sólidos de basura y lixiviados procedentes de estas.
- Sustancias químicas varias procedentes de procesos industriales.
- Compuestos y sustancias químicas en suspensión que se han precipitado.

La composición de este polvo procedente del barrio de la ciudad puede analizarse, observando más del 50% partículas con tamaños entre 0.25 y 0.5 mm. El agua de escorrentía arrastra las partículas más finas y algunas disueltas, teniendo en cuenta medidas



reales se ha estimado que más de un 80% presenta tamaños inferiores a los 0.125 mm. En la Tabla 2 se presenta la composición de agua de escorrentía de superficie urbana referente a 4 estudios llevados a cabo en 1984 (Gomez, 2007).

**Tabla 2. Análisis Granulométrico del Material de Escorrentía.**

Tamaño (µm)	Sacramento	Harrisburg	Milwaukee	Eiland	Media
> 250	1.54	6.10	14.56	3.58	6.45
88 – 250	9.07	6.70	7.00	1.30	6.02
44 – 88	10.70	11.70	5.84	8.06	9.08
< 44	78.69	75.50	72.60	87.06	78.45

Fuente: Rexnord Inc. 1984. Source and migration of highway runoff pollutants. Research report FHWA

La mayor parte de contaminación de metales pesados como el hierro, zinc y plomo se detectan en la superficie de calles, debido a las emisiones industriales o vehículos, estos últimos también desprenden grasas y aceites, la cantidad de estos dependen del tipo de motor y de la cantidad de tráfico. Esto también depende del tipo de pavimento, ya que cada uno presenta una capacidad de almacenamiento diferente, en un pavimento bituminoso es mayor la carga contaminante que en un pavimento de hormigón. Además, influyen también las condiciones de mantenimiento y conservación, las obras que se realicen en la ciudad, el periodo de limpieza de calles, entre otros (Gomez, 2007).

Existen diferentes funciones de acumulación de carga contaminante en la superficie como:

Potencial:  $Carga(t)(Tm/Ha) = C_1 t^{c_2}$

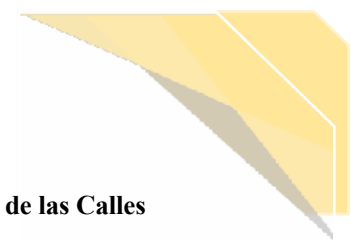
Exponencial:  $Carga(t)(Tm/Ha) = C_3(1 - e^{-tc_4})$

Michaelis – Menton:  $Carga(t)(Tm/Ha) = \frac{c_5 t}{c_6 + t}$

En donde sus coeficientes de ajuste se deben ajustar a partir de datos de campo.

### 1.1.2.3. Escorrentía Superficial

El encargado del arrastre de la carga contaminante hasta la red y evacuándola hacia el medio receptor es el agua de lluvia. En Estados Unidos se ha determinado que más del 80% de los problemas de contaminación en medios acuáticos se debe a las escorrentías urbanas. También se considera que las intensidades y duraciones de lluvia asociadas son suficientes para la limpieza de un 90% de la carga contaminante en calles (Gomez, 2007).



**Tabla 3. Intensidades y Duraciones de Lluvia para Limpieza de Contaminantes de las Calles**

Intensidad mm/h	Duración (hora)
2.54	5.0
8.40	1.5
12.7	1.0
25.4	0.5

**Fuente:** Environmental Protection Agency

Estudios recientes determinaron también que algunos contaminantes como nitrógeno, cobre, cadmio y otros metales pesados son aportados principalmente por el agua de lluvia, pero no es posible dar unos datos de concentraciones medias, dada su variabilidad en condiciones protectoras de contaminación. El proceso de lavado y arrastre de materiales en superficie por obra de la escorrentía se suele representar mediante la siguiente fórmula de tipo exponencial (Gomez, 2007).

$$\frac{dP}{dt} = -KIP$$

**Ecuación 1. Proceso de Lavado y Arrastre de Materiales**

Dónde: I: Intensidad de precipitación. (Lluvia  
 P: Carga de sólidos existente en neta)  
 superficie. K: Coeficiente de ajuste.

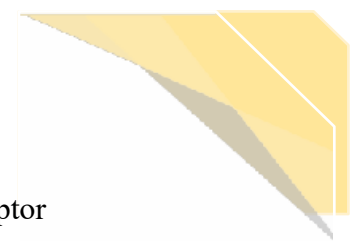
**1.1.2.4. Cargas Máficas**

Es la carga de un contaminante arrastrada por la escorrentía de lluvia, durante un periodo de tiempo y por unidad de área, estos datos se refieren como concentraciones medias y se emplean cuando no existe información detallada de la evolución en el tiempo de la carga contaminante (Gomez, 2007):

$$L=CR$$

**Ecuación 2. Carga Contaminante**

Dónde: L: Carga anual (mg/m<sup>2</sup>/año) R: Volumen de escorrentía anual  
 C: Concentración media (mg/l) (mm/año)



### 1.1.3. Objetivos de Calidad. Estándares de Calidad en el Medio Receptor

Existen dos tipos de forma para considerar el impacto ambiental que se genera sobre los cauces que provocan los vertidos desde las redes de alcantarillado unitarias.

- Estándares de emisión: En este se estudian e imponen restricciones a los vertidos que se realizan, evaluando su frecuencia, volumen, carga contaminante, etc. El problema está que un mismo tipo de vertido puede generar efectos totalmente diferentes sobre un río u otro. En un caso puede ser un pequeño caudal de vertido con una carga contaminante fácilmente diluida por un canal de río importante, en otro puede suponer un caudal de vertido muy superior al que lleva el río. Y reconociendo que cualquier reducción de vertidos es positiva, no se valora cualitativamente la repercusión que tiene sobre el medio fluvial.
- Objetivos de calidad ambiental: Son objetivos que se plantean directamente al medio. Evaluando la capacidad del medio receptor para adaptarse a los contaminantes donde se puede especificar que impactos tolera el río.

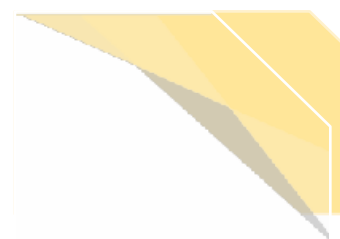
Se han establecido 5 niveles en función de unos valores de oxígeno disuelto, DBO, amoníaco y amoníaco no ionizado, teniendo en cuenta la necesidad de desarrollar estándares en caso de vertido para proteger la vida acuática (Gomez, 2007).

**Tabla 4. Estándares de Calidad del Río, Basados en Percentiles**

Clase	% OD Saturación Percentil 10	DBO (mg/l) percentil 90	Amonio (mg N/l) percentil 90	Amoníaco (mg N/l) percentil 95
RE1	80	2.5	0.25	0.021
RE2	70	4.0	0.60	0.021
RE3	60	6.0	1.30	0.021
RE4	50	8.0	2.50	-
RE5	20	15.0	9.00	-

**Fuente:** Gómez, Manuel (2007); Departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental. UPC.

Los vertidos en tiempo de lluvia en periodos cortos pueden afectar significativamente. Sin embargo, el impacto puede ser desproporcionado. De esto surge la elaboración de estándares de vertidos no continuados sino discontinuos.



#### 1.1.3.1. Estándares para Vertidos Discontinuos

El problema de estos vertidos es que afecta la calidad de los medios RE1 o RE2 en estos se plantea la conservación de la vida piscícola, en donde un vertido puntual puede generar mortandad de las especies. Esto fue apreciado en diferentes países en donde se presentó este suceso, estableciendo 3 tipos de estándares, referentes a diferentes niveles de protección para episodios de hasta 1 año de periodo de retorno que son (Gomez, 2007):

- Ecosistema adecuado para salmónidos.
- Ecosistema adecuado para ciprinidos.
- Ecosistema marginal para ciprinido.

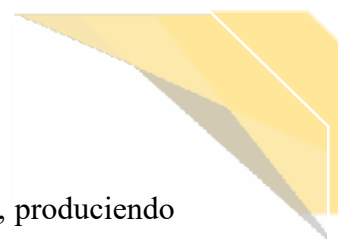
Los dos primeros proporcionan protección para toda la vida del pez, el ultimo tan solo una protección adecuada para individuos adultos.

#### 1.1.4. Estrategias de Solución del Problema

En el estudio realizado por Gómez Valentín se dedujo que, para reducir el impacto de contaminantes sobre los cauces naturales procedentes de vertidos de red de drenaje en tiempo de lluvia, se debe abordar en forma conjunta la cantidad y la calidad del agua de la cuenca urbana estudiada. Aspirar que el 100% de las aguas de escorrentía urbana se depuren antes del vertido no es practicable, debido a que se debería diseñar instalaciones de tratamiento y depuración superiores a las que ya se tienen. Se debe analizar la distribución de carga contaminante transportada por el caudal de escorrentía para así determinar si existe el primer lavado de la superficie (first flush). Si es así se puede plantear la posibilidad de almacenar toda el agua de escorrentía o la primera parte que es la que transporta la carga contaminante superior. Pero encontrar reservas de espacio para un almacenamiento de volumen moderado no es fácil, por esto se han enfocado dos soluciones (Gomez, 2007):

##### 1.1.4.1. Almacenamiento en la Red y en Depósitos de Retención

Esto aplica para lluvias moderadas la propia red sea la que almacene sus volúmenes de escorrentía, evitando así el vertido al medio receptor, para esto se debe disponer de elementos de regulación. En caso de que aumente la precipitación estos elementos dejarían



de actuar y las condiciones de funcionamiento natural de la red se restituirían, produciendo el vertido en el cauce. Esto supone que se dispone de una red con una capacidad de almacenamiento alta, que se tiene un conocimiento muy exacto del estado de la red y las repercusiones que tiene maniobrar los órganos de control que se deben instalar. Se puede plantear el almacenamiento de los primeros volúmenes de agua en un depósito construido, este puede disponerse intercalado en línea en la red o en paralelo, donde el agua debe llegar después de sobrepasar una estructura de intercepción. Una diferencia del funcionamiento entre ambos es que el vaciado del depósito en paralelo debe hacerse con ayuda de bombeo (Gomez, 2007).

#### 1.1.5. Consideraciones Finales

Teniendo en cuenta nuestro caso de estudio, y lo presentado anteriormente de la investigación desarrollada por Gómez Valentín en donde también se ha querido plantear atención a un problema de contaminación en medios naturales que se originan por vertidos procedentes de redes urbanas contemplando que los aspectos cuantitativos priman en estudios de actuación sobre la red, se toma como referencia que no se debe olvidar la conservación de los medios naturales y el control de los vertidos sin depurar, ya que muchas veces las fuentes de contaminación son los vertidos puntuales de las redes de drenaje urbano. Es necesario analizar específicamente cada caso y el reducir la carga contaminante contemplando el tratamiento conjunto de cantidad y calidad. No olvidando que, aunque el objetivo principal de la red de drenaje es drenar las aguas lluvia de la superficie, este se puede y debe cumplir salvaguardando las condiciones del medio al que cada red vierte. Todo lo relacionando en el ítem 1.1. sirviendo de base para el desarrollo de la presente investigación (Gomez, 2007).

Jerónimo Puertas, Joaquín Suarez, pertenecientes a la Universidad de Coruña, José Ramón Barro del Ministerio de Medio Ambiente y Luis Ortega de Infraestructura y Ecología realizaron el programa presentado a continuación, pertinente para el desarrollo de nuestra investigación. (Barro, Suarez, & Puertas, 2015)



## 1.2. Programa Nacional de Medición de Descargas de Sistemas Unitarios

### 1.2.1. Antecedentes

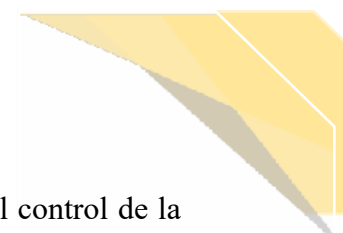
Anteriormente solo se prestaba atención al drenaje y control de las inundaciones para evitar daños económicos y humanos, hasta hace poco tiempo se empezaron a considerar los problemas de degradación de la calidad que originan las aguas pluviales ni las aguas vertidas desde sistemas unitarios con alta dilución, debido a estudios realizados se denotó que la carga contaminante que tienen las aguas pluviales no es despreciable. Este problema es mayor en zonas urbanas ya que se aumenta la superficie impermeable, incrementando la escorrentía y actividades que generan una mayor concentración de contaminantes y sólidos en suspensión susceptibles a ser arrastrados por periodos de lluvia.

Este es un problema que se da tanto en redes unitarias y pluviales, el primer problema está en los reboses del alcantarillado llamados “descargas de sistemas unitarios de alcantarillado” estos se asocian a la insuficiencia de drenaje de la red manifestándose en el vertido al medio receptor con una carga contaminante proveniente de la cuenca urbana. Se genera entonces esta investigación realizada por la dirección general de obras hidráulicas y calidad de las aguas con la colaboración de infraestructura y ecología S.L y la Universidad da Coruña (Barro, Suarez, & Puertas, 2015).

### 1.2.2. Conceptos Fundamentales de Descarga de Sistemas Unitarios

Una gran parte del problema se origina por vertimientos intermitentes que se producen durante y después de las lluvias desde los alcantarillados unitarios de núcleos urbanos. Este tipo de vertidos se denomina reboses de alcantarillado unitario, descargas de sistemas unitarios o alivios de tormenta, fue en Estados Unidos donde se reconoció este problema y luego de un año de estudios de caracterización se propusieron las medidas pertinentes comprobando así su elevado costo económico y hoy sigue siendo una de las principales causas de contaminación del agua.

En España siguieron con el control de contaminación de agua siguiendo pautas similares a las estadounidenses, concluyendo que la eliminación o minimización de los reboses de sistemas unitarios debía considerarse como objetivo prioritario en planes de saneamiento y



mejora de la calidad de agua en sistemas acuáticos. Actualmente se admite el control de la descarga de sistemas unitarios “DSU” bajo el principio de la gestión integrada, considerando las relaciones entre: lluvia, superficie de la cuenca, sistemas de colectores, estación depuradora, medio receptor aplicando siempre las definidas como técnicas de gestión de la escorrentía urbana. Para esto se necesita tener un buen conocimiento de (Barro, Suarez, & Puertas, 2015):

- Objetivos de calidad del agua en el medio receptor.
- Medida y análisis de lluvias.
- Modelos de transformación de lluvia-escorrentía.
- Caracterización y modelo de reboses.
- Comportamiento de la estación depuradora frente a variaciones de caudal y carga.
- Capacidad auto depuradora del medio receptor.

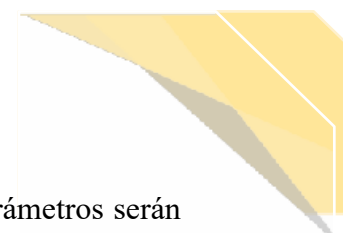
Se debe generar una estrategia de control total de la contaminación para minimizar los impactos y que permita alcanzar los objetivos de transporte y mantenimiento de la calidad de agua, establecer un nivel de contaminación que el medio receptor puede asumir y asegurar que no sea superada (Barro, Suarez, & Puertas, 2015).

### 1.2.3. Caracterización de las Cuencas

Este estudio se centra en el análisis de las cargas contaminantes circulantes por el alcantarillado y que posteriormente son vertidos al medio receptor en episodios de lluvia en cinco ciudades que son: Barcelona, Madrid, Sevilla, Valencia y Vitoria.

#### 1.2.3.1. Descripción de las Cuencas (Barro, Suarez, & Puertas, 2015)

- Barcelona – Bac de Roda: Cuenca urbana de 170 Ha drenadas, con alcantarillado unitario, entrega al mar mediterráneo con sección de dos cajones de 5 m de anchura y 2 m de altura. Pendiente de 0.1% y 80% de impermeabilidad, es una zona con expansión urbanística por ende los parámetros pueden cambiar en un futuro.
- Madrid – Arroyo del Fresno: Cuenca mixta de uso urbano y rural con 3800 Ha y pendiente del 2%, red de saneamiento unitaria con entrega al río Manzanares.



Impermeabilidad del 37%. Siendo una cuenca de gran dimensión, sus parámetros serán representativos del conjunto de la cuenca y no podrán imputarse a un uso concreto.

- Sevilla – Los remedios: Cuenca urbana, de 135 Ha, densa edificación con bloques de más de 4 m de altura. Pendiente de 05%. Entrega a la estación de bombeo de Los Remedios, junto al río Gualdaquivir. Cuenca homogénea, y escasa pluviometría.
- Valencia – Malvarrosa: Cuenca urbana y de baja pendiente, 89.7 Ha, 74Ha drenadas por la red, su restante corresponde a playas. Clima mediterráneo, su medio receptor es el Mar Mediterráneo, cuenta con una estación de bombeo para impulsar aguas residuales, los alivios son vertidos al mar. Su grado de impermeabilización es representativo, pero con estructuras no muy altas.
- Vitoria – Almendra: Cuenca de 132 Ha, pendientes de 3% o más en la zona de Almendra, en Ensanche bajan sus pendientes. Su medio receptor es el río Zadorra, zona densamente urbanizada, completamente impermeable.

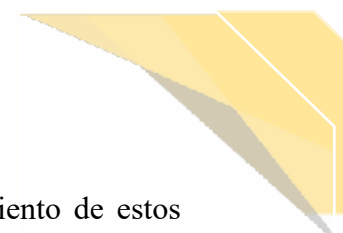
#### 1.2.3.2. Características de las Cuencas

Debido a que los procesos de acumulación de contaminación en la superficie de la cuenca dependen principalmente de los usos y actividades que se realicen en ella, se elaboró un cuestionario para obtener información mínima de la caracterización de las cuencas, en donde se tenía en cuenta la siguiente información (Barro, Suarez, & Puertas, 2015):

- Principales actividades que se realizan.
- Tipo de tráfico.
- Pavimentación de las calles.
- Densidad poblacional.
- Número de plantas de los edificios, tipo de sótanos, diseño del tejado.
- Hábitos de limpieza.
- Vegetación de las calles.
- Estado e infiltración de la red de alcantarillado.
- Contaminación atmosférica.
- Posible contaminación por obras.

#### 1.2.4. Objetivos y Metodología del Trabajo

El principal objetivo del estudio es la evaluación y caracterización de las cargas contaminantes asociadas a las descargas de sistemas unitarios planteando campañas para



toma de muestras en tiempo de lluvia para su posterior análisis. El tratamiento de estos datos permitirá evaluar las cargas que aporta la cuenca al medio receptor y permitir establecer medidas correctivas a esta contaminación, como interponer depósitos de retención; buscando comparar los resultados de las distintas ciudades.

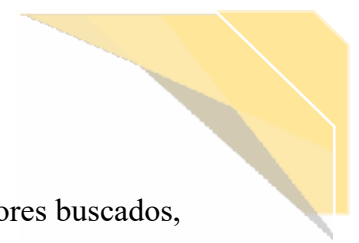
El nivel de aproximación que se utiliza en un estudio de caracterización de aguas de escorrentía de tormenta es en función de los problemas de impacto sobre la calidad de las aguas en el medio receptor que es necesario estudiar o solucionar y de los objetivos que se buscan condicionados por los recursos disponibles. Existen tres niveles de aproximación (Barro, Suarez, & Puertas, 2015):

- Cargas medias anuales aportadas por las tormentas: Estima la carga total de contaminación aportada por las aguas de tormenta desde una cuenca o área urbana durante un año. Este tipo es útil cuando se estudian problemas de calidad de aguas a largo plazo.
- Cargas asociadas a sucesos de tormenta: Estima la distribución de cargas asociadas a cada suceso de tormenta a lo largo de un año indicando la variabilidad de la contaminación total o generada en cada suceso de tormenta. Es útil cuando se analizan problemas transitorios de contaminación
- Variación de la carga durante un suceso de tormenta: Describe la carga de un suceso de tormenta en función del tiempo de cada suceso. Este permite estudiar el efecto de las diferentes fuentes de contaminación y de variaciones de intensidad de lluvia indicando la existencia del primer lavado de contaminantes. Este tipo es adecuado para el diseño de estructuras de control y tratamiento de aguas de tormenta.

#### 1.2.5. Evolución Temporal de la Campaña de Muestreo. Incidencias

Se consideraron los siguientes aspectos para ubicar las estaciones para tomar muestras (Barro, Suarez, & Puertas, 2015):

- Economía de la instalación, para evitar obras de infraestructura costosas.
- Representatividad del punto de muestreo, para que los datos obtenidos sean relevantes.
- Comodidad de acceso para el personal de mantenimiento, y así evitar accidentes y trabajos en condiciones penosas.

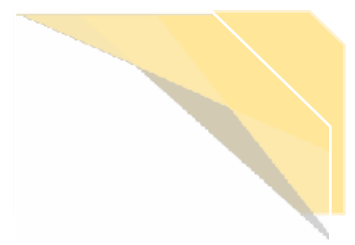


- Características hidráulicas favorables para una correcta medida de los valores buscados, evitando tramos con régimen hidráulico poco definido o afectado de forma grave.
- Resguardo frente a inundaciones, con objeto de que fuertes avenidas no afecten los equipos de medición.

#### 1.2.6. Síntesis de Resultados

Los valores de concentración máxima obtenidos presentan uniformidad en todas las cuencas. Considerando los indicadores habituales, SST y DQO se observan valores muy semejantes excepto en Valencia, este hecho se repetirá sistemáticamente debido a que su sistema de evacuación de aguas asume los excedentes de regadío suponiendo una fuente de aguas parasita difícil de evacuar y segregar. Por ende, estos valores no se consideran a la hora de proponer tendencias generales para las cuencas de territorio estatal. Las concentraciones medias no proponen un valor puntual sino una estimación de la carga media transportada durante todo el periodo de lluvia. Hay cierta homogeneidad entre los valores medidos en distintas cuencas, con la excusa del caso de Valencia. Los datos obtenidos están dentro del orden de magnitud de la bibliografía, aunque los valores de DQO y SST se encuentran en el extremo superior o incluso sobre los intervalos propuestos.

La carga movilizada es un valor independiente de posibles fuentes de agua parasita limpia que aportan a la cuenca, dando solo una idea de la contaminación disponible y movilizada en superficie y en el sistema de colectores. En este caso los valores son altos para la cuenca de Valencia, indicando que la contaminación disponible es muy alta. Teniendo en cuenta que los colectores de Valencia y Barcelona tienen mayor dimensión, sus características de precipitación, bajas pendientes, conlleva deposiciones de gran magnitud en los colectores movilizados durante los sucesos de lluvia respecto a las demás ciudades y una vez obtenidos los datos más relevantes para cada cuenca, se plantea que los resultados obtenidos para una cuenca sirvan para reproducir comportamientos de otra. Realizando un análisis de datos obtenidos, mediante el ajuste de distintas funciones de distribución se estableció que su mejor ajuste es el log normal (Barro, Suarez, & Puertas, 2015).



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Alcantarillado

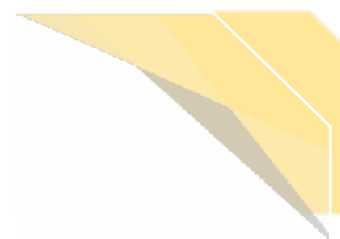
El sistema de alcantarillado consiste en una serie de tuberías y obras complementarias, necesarias para recibir y evacuar las aguas residuales de la población y la escorrentía superficial producida por la lluvia. De no existir estas redes de recolección de aguas, se pondría en grave peligro la salud de las personas debido al riesgo de enfermedades epidemiológicas y, además, se causarían importantes pérdidas materiales (Lopez Cualla, 2004).

Las aguas residuales pueden tener varios orígenes:

- Aguas residuales domesticas: Aquellas provenientes de inodoros, lavaderos, cocinas y otros elementos domésticos. Estas aguas están compuestas por solidos suspendidos (generalmente materia orgánica biodegradable), solidos sedimentables (principalmente materia inorgánica), nutrientes (nitrógeno y fosforo) y organismos patógenos.
- Aguas residuales industriales: Se originan de los desechos de procesos industriales o manufactureros y, debido a su naturaleza, pueden contener, además de los componentes citados anteriormente respecto a las aguas domésticas, elementos tóxicos tales como plomo, mercurio, níquel, cobre y otros, que requieren ser removidos en vez de ser vertidos al sistema de alcantarillado.
- Aguas lluvias: Proviene de la precipitación pluvial y, debido a su efecto de lavado sobre tejados, calles y suelos, pueden contener una gran cantidad de solidos suspendidos; en zonas de alta contaminación atmosférica, pueden contener algunos metales pesados y otros elementos químicos.

#### 2.1.1. Sistemas de Alcantarillados

Los sistemas de alcantarillado pueden ser de dos tipos: convencionales o no convencionales. En general, los convencionales son tuberías de grandes diámetros que permiten una gran flexibilidad en la operación del sistema. Se clasifican según el tipo de



agua que conduzcan (Lopez Cualla, 2004):

- Alcantarillado separado: Es aquel en el cual se independiza la evacuación de las aguas residuales y lluvias. Se tiene entonces.
  - Alcantarillado sanitario: Sistema de recolección diseñado para recolectar exclusivamente las aguas residuales domesticas e industriales.
  - Alcantarillado pluvial: Sistema de excavación de la escorrentía superficial producida por la precipitación.
- Alcantarillado combinado: Es un alcantarillado que conduce simultáneamente las aguas residuales (domesticas e industriales) y las aguas lluvias.

Los sistemas de alcantarillados no convencionales se clasifican según el tipo de tecnología aplicada y en general se limitan a la evacuación de las aguas residuales.

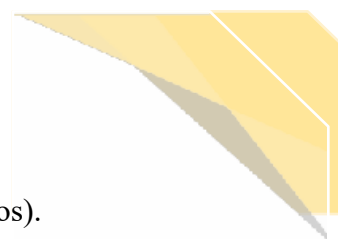
- Alcantarillado simplificado: Un sistema de alcantarillado sanitario simplificado se diseña con los mismos lineamientos de un alcantarillado convencional, pero teniendo en cuenta la posibilidad de reducir diámetros y disminuir distancias entre pozos al disponer de equipos de mejores equipos de mantenimiento.
- Alcantarillado condominial: Son los alcantarillados que recogen las aguas residuales de un pequeño grupo de vivienda (< 1 hectárea) y las conducen a un sistema de alcantarillado convencional.
- Alcantarillado sin arrastres de solidos: También conocidos como alcantarillados a presión, son sistemas en los cuales se eliminan los sólidos de los efluentes de la vivienda por medio de un tanque interceptor.

## 2.2. Contaminantes

Los contaminantes son sustancias que pueden alterar nocivamente la naturaleza o las condiciones normales de una cosa o un medio por acciones químicas o físicas (Seco I. , 2016).

Existen diferentes tipos de contaminación en sistemas acuáticos:

- Química: Productos químicos, pesticidas, biocidas, herbicidas, productos industriales, detergentes, aceites, combustibles.



- Microbiológica: Microorganismos patógenos (bacterias, virus, protozoos).
- Consumidores de Oxígeno: Exceso de materiales biodegradables.
- Materia en Suspensión: Sustancias no solubles.

En donde algunas fuentes de contaminación están:

- Aguas residuales municipales: Descargas de agua domesticas sin tratar, compuestos orgánicos, desechos de alimentos, grasas, aceites, papel, etc.; productos químicos (metales, detergentes, sales, etc.)
- Lixiviados de los basureros: Líquidos que se producen por la descomposición de la basura y que se filtran al suelo.
- Vertidos industriales, agricultura: Sustancias toxicas como: Nitratos, fosfatos, metales pesados (arsénico, cadmio, mercurio, plomo, etc.), contaminación térmica, agentes infecciosos y sustancias radiactivas.
- Gases contaminantes: Debido a diversos gases generados en procesos productivos, dióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, óxido de azufre.

Su procedencia:

- Agricultura y ganadería.
- Generadores de energía eléctrica.
- Tratamiento de residuos
- Transporte
- Natural
- Antropogénico.

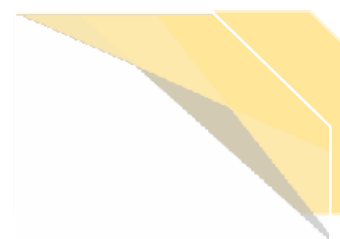
Medio Receptor:

- Atmosféricos.
- Acuáticos.
- Urbanos.
- Suelo.

### 2.2.1. Parámetros Indicadores de Contaminación.

Parámetros Físicos:

- Color.
- Turbidez. (UNT)
- Sólidos en Suspensión. (mg/L)
- Conductividad. (S/m)
- Radioactividad. (Bq)
- Temperatura (°C)



#### Parámetros Químicos:

- pH.
- Materia Orgánica.
- Carbono Orgánico Total. %
- DBO. (mg/L)
- DQO. (mg/L)
- Nutrientes.
- Cloro y Cloruro. (mg/L)
- Sulfatos y Sulfuros. (mg/L)
- Fosforo y Derivados.
- Grasas y Aceites.
- Metales.
- Pesticidas. (mg/L)

#### Parámetros Biológicos:

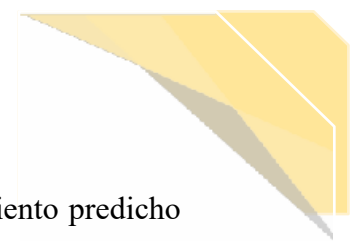
- Coliformes Totales y Fecales. NPM/100 ml
- Salmonella. NPM/100 ml
- Estreptococos Fecales. NPM/100 ml
- Enterovirus. NPM/100 ml

### 2.3. Modelización.

“Es la representación matemática más o menos simplificada de un fenómeno físico observable que permite simular su funcionamiento y así estudiar el efecto de determinados parámetros y que permite realizar previsiones. El notable avance de la informática ha ayudado a desarrollar software de modelación que permiten contar con potentes capacidades de cálculo, resolviendo con rapidez las ecuaciones matemáticas representativas de fenómenos físicos y dinámicos determinados” (Berroeta Bustos, Santiabañez González, Clarys, & Diericks, 2000).

### 2.4. Calibración.

Según Cesario, calibración “es el proceso de ajuste de un modelo hasta que es capaz de simular las condiciones que prevalecen en el sistema para un horizonte de tiempo determinado (por ejemplo, el pico de consumo en un escenario de tiempo específico), con un grado de precisión pre-establecido” (Cesario, 1995). Por otra parte, Walski, Chase, Grayman, Beckwith, & Koelle, (2003) definieron que “es el proceso de comparar los resultados de un modelo con la información recopilada en campo, generalmente es



necesario ajustar los datos que describen el sistema hasta que el comportamiento predicho este de acuerdo razonablemente con el comportamiento observado en la realidad para diferentes condiciones de operación”.

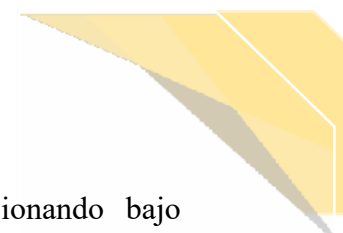
## 2.5. Validación.

“La validación de un modelo computacional es un proceso para formular y documentar la aplicabilidad de los resultados del modelo en relación con el sistema natural que se quiere representar. Su propósito es confirmar que el modelo corresponda con la realidad física que se quiere modelar, es decir, que las predicciones realizadas sean lo suficientemente confiables para ser usadas en la toma de decisiones” (Ditmars, Adams, Bedford, & Ford, 1987).

## 2.6. SWMM (Storm Water Management Model)

El stormwater Management Model (Modelo de gestión de aguas pluviales) de la EPA (SWMM) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones que se puede utilizar por un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad de agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo (National Risk Management Research Laboratory, 2005).

SWMM se desarrolló por primera vez en 1971, habiendo experimentando desde entonces diversas mejoras. La edición actual, que corresponde a la 5ª versión del programa, es un



código reescrito completamente a partir de ediciones anteriores. Funcionando bajo Windows, EPA SWMM 5 proporciona un entorno integrado que permite introducir datos de entrada para el área de drenaje, simular el comportamiento hidráulico, estimar la calidad del agua y ver todos estos resultados en una gran variedad de formatos. Entre estos, se pueden incluir mapas de contorno o isoclinas para el área de drenaje, gráficos y tablas de evolución a lo largo del tiempo, diagramas de perfil y análisis estadísticos de frecuencia (National Risk Management Research Laboratory, 2005).

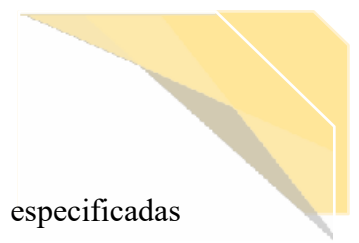
### 2.6.1. Características del Modelo Hidrológico

SWMM considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas. Entre estos se encuentran:

- Precipitaciones variables en el tiempo.
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas.
- Acumulación y deshielo de nieve.
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones.
- Infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas.
- Entrada del agua de la percolación.
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte.
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial.

Además de modelar la generación y transporte de la escorrentía superficial, SWMM puede también estimar la producción y evolución de cargas contaminantes asociadas a dicha escorrentía. Se pueden modelar los siguientes procesos para cualquier número de sustancias asociados a la calidad del agua definidas por el usuario (National Risk Management Research Laboratory, 2005):

- Acumulación del contaminante durante tiempo seco para diferentes usos del suelo.
- Arrastre del contaminante en determinados usos del suelo durante episodios de tormenta.
- Contribución directa debida a la propia lluvia.
- Reducción de la acumulación debida a la limpieza de calles en tiempo seco.
- Reducción en cargas de arrastre debidas a buenas prácticas de gestión.



- Entradas de flujos sanitarios en tiempo seco y otros aportes externos especificadas por el usuario en cualquier punto del sistema de drenaje.
- Seguimiento de las sustancias asociadas a la calidad del agua a lo largo de todo el sistema.
- Reducción en la concentración del contaminante por medio de tratamientos en depósitos o debido a procesos naturales en tuberías y canales.

### 2.6.2. Características del Modelo de Calidad

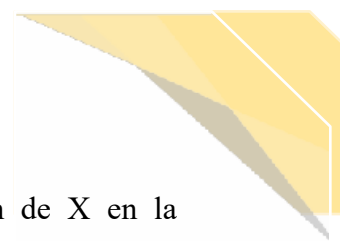
SWMM tiene la capacidad de analizar acumulación, arrastre, transporte y tratamiento de cualquier número de constituyentes de la calidad del agua. Los pasos necesarios para realizar un análisis de este tipo son (National Risk Management Research Laboratory, 2005):

- Identificar los contaminantes que se desean analizar.
- Definir las categorías de usos del suelo que generan estos contaminantes.
- Seleccionar los parámetros de las funciones de acumulación y arrastre que determinan la calidad derivada de la escorrentía de cada tipo de uso del terreno.
- Asignar la mezcla de usos del terreno de cada una de las cuencas.
- Definir las funciones de eliminación de contaminantes en aquellos nudos del sistema de drenaje que tengan capacidad de tratamiento de estos.

SWMM permite estudiar la generación de entrada y transporte de cualquier número de contaminantes definidos por el usuario. La información necesaria para cada uno de estos agentes contaminantes es (National Risk Management Research Laboratory, 2005):

- Nombre del agente contaminante.
- Unidades de concentración (miligramo/litro, microgramos/litro o unidades/litro).
- Concentración del contaminante en las aguas provenientes de la lluvia
- Concentración del contaminante en las aguas subterráneas.
- Concentración del contaminante en los procesos de entrada directa o infiltración.
- Coeficiente de decaimiento para la reacción de primer orden.

Es posible definir también agentes contaminantes asociados. Un contaminante X puede



tener un contaminante asociado Y, lo que significa que la concentración de X en la escorrentía tiene una fracción fija de la concentración de escorrentía de Y añadida a la misma.

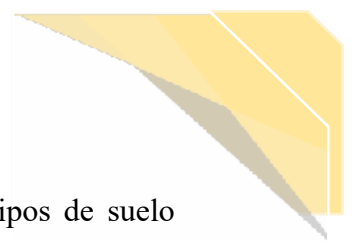
La acumulación y arrastre de contaminante desde las áreas de las cuencas se determinan a partir de los usos del suelo asignados a dichas áreas. Es posible también introducir cargas de contaminante en el sistema de saneamiento mediante series temporales de caudales de entrada, así como mediante los caudales de tiempo seco (National Risk Management Research Laboratory, 2005).

### 2.6.3. Uso del Suelo

Los usos del suelo son categorías de las actividades desarrolladas o bien características superficiales del suelo asignadas a las cuencas. Algunos ejemplos de posibles usos del suelo son: uso residencial, industrial, comercial y no urbanizado. Estos se consideran únicamente para considerar los fenómenos de acumulación y arrastre de contaminantes en las cuencas.

Los procesos que definen cada uno de los usos del suelo son (National Risk Management Research Laboratory, 2005):

- Acumulación del contaminante: Se describe como la masa por unidad de área de la cuenca. La cantidad de contaminante acumulado es una función del número de días de clima secos previos a la lluvia y puede calcularse mediante una función potencial, exponencial o de saturación.
- Arrastre del contaminante: Este ocurre durante los periodos secos y puede describirse mediante arrastre exponencial, curva de flujo de arrastre o concentración media del episodio. En cualquiera de estos casos, la acumulación de contaminante disminuye conforme se procede el fenómeno de arrastre. De esta forma el fenómeno de arrastre finaliza cuando no existe más contaminante acumulado. Las cargas de arrastre para determinado contaminante y uso de suelo pueden reducirse en un porcentaje fijo sin más que especificar las mejores prácticas de manejo usadas en el rendimiento de eliminación. Este valor refleja la efectividad de cualquiera de los controles asociados con el uso del suelo.



- Limpieza de calles: Se puede utilizar periódicamente en todos los tipos de suelo para reducir la acumulación de determinados agentes contaminantes teniendo en cuenta los días entre dos limpiezas consecutivas, días desde la última limpieza y el principio de la simulación, la fracción de los contaminantes acumulados que es posible eliminar mediante la limpieza de calles y la fracción de los contaminantes acumulados que se elimina mediante la limpieza. Estos parámetros pueden ser diferentes para cada tipo de suelo, y el último varía también dependiendo del contaminante.

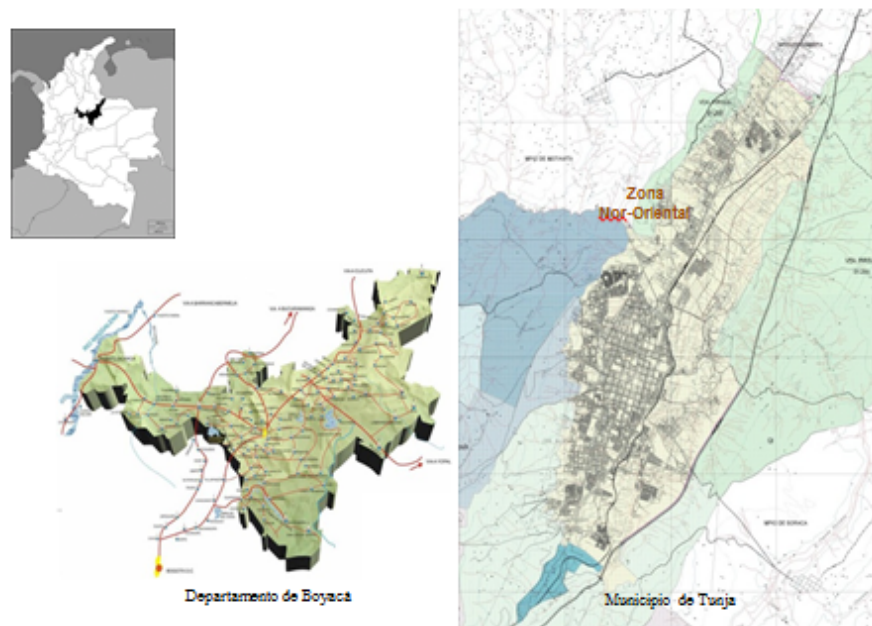


### 3. METODOLOGÍA

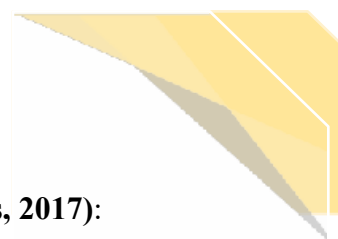
#### 3.1. Descripción Zona de Estudio.

Tunja es una ciudad colombiana, capital del departamento de Boyacá, situada en el centro-oriente de Colombia, en la región del Alto Chicamocha. Está ubicada en las coordenadas  $5^{\circ}32'7''N$   $73^{\circ}22'04''O$  / 5.53528, -73.36778 y su longitud en relación con Bogotá es de 0 grados, 43 minutos y 0 segundos. Su extensión territorial es de 118 Km<sup>2</sup>, de los cuales el 87% corresponde al área rural y el 13% al área urbana. La altura sobre el nivel del mar de la cabecera municipal es de 2.775 metros, aunque en la jurisdicción del municipio la altura máxima es de 3.200 metros en límites con Cucaita y su altura mínima es de 2.400 metros sobre el nivel del mar, en límites con el Municipio de Boyacá. Limita al norte con Motavita, Cómbita y Oicatá, al oriente con Oicatá, Chivatá y Soracá, al sur con Boyacá, Ventaquemada y Samacá, y al occidente con Samacá, Sora y Cucaita. Su fundación hispánica data del 6 de agosto de 1539 (Santiago de Tunja, Tesoro Colonial, la muy Noble y Leal., 2007).

Figura 3. Localización General



Fuente: AMAYA TEQUIA, W.E. - LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2018



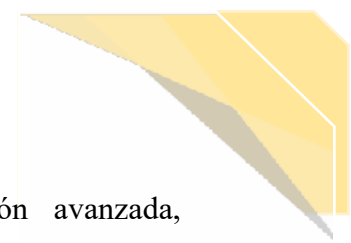
### 3.1.1. Descripción Local (**Gerencia de Planeación y Construcciones, 2017**):

La zona nororiental de Tunja, potencial desarrollo de la ciudad, cuenta con un área aproximada de 285 ha, a lo largo de la avenida universitaria.

Formulación Uso de Suelo Urbano. A lo largo de la avenida universitaria se presentan usos de suelo específico, a saber: residencial exclusivo unifamiliar, uso institucional y uso mixto. Específicamente se hallan usos:

- Residencial Exclusivo Unifamiliar: Área cuyo uso principal es el residencial, el cual solamente permite el desarrollo de algunos usos de bajo impacto urbanístico, compatibles a él. Para el área urbana de Tunja se identifica con el código U.P.R.E (Urbano Privado Residencial Exclusivo).
- Institucional 2: Áreas destinadas a uso institucional específico, a saber:
  - ✓ *Educación*: institutos técnicos, especializados, centros de capacitación, colegios de enseñanza media y similar.
  - ✓ *Administrativos*: centros administrativos locales, Centros de Atención inmediata y de tele-comunicaciones.
  - ✓ *Social-cultural*: Teatros al aire libre, centros culturales comunitarios y academias.
  - ✓ *Asistencial*: Instituciones prestadoras de servicio de salud del nivel uno.
  - ✓ *Recreativos*: polideportivos, escenarios al aire libre. Las demás actividades de esta categoría son prohibidas. Se identifica con el código U.P.E.L.
- Residencial Mixto X1 y X2: Áreas destinadas al uso residencial, pero que permite el desarrollo o mezcla con otros usos, en especial de comercio, servicio o industria, desarrollados en forma independiente o dentro de la misma vivienda. Para el área urbana de Tunja se identifica con el código U.P.R.M (Urbano Privado Residencial Mixto).

Susceptibilidad a Inundación. La actual tendencia en la ciudad es la de edificar en las zonas aluviales de los Ríos Jordán y La Vega, zonas que, por la dinámica propia de los ríos, en ciertos periodos presentan inundaciones. Partiendo de la anterior premisa las principales causales de incremento en el grado de susceptibilidad a inundación que afecta a la zona

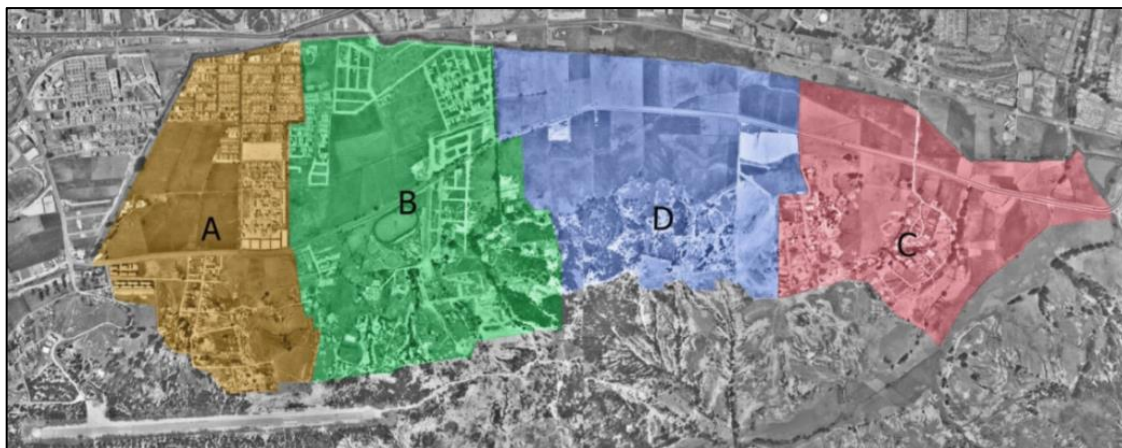


nororiental del Municipio de Tunja, son las provenientes de erosión avanzada, carcavamientos y sofusión, especialmente sobre los dos flancos del Sinclinal de Tunja. (Gerencia de Planeacion y Construcciones, 2017).

### 3.1.2. Distritos de Drenaje Zona Nor- Oriental

Basados en la compilación de información realizada y teniendo en cuenta la sectorización contemplada en el Plan Maestro de Alcantarillado de Tunja, la zona nororiental se encuentra dividida en cuatro distritos de drenaje: Santa Inés (A), Altagracia (B), Villita (D) y Casa Verde (C), ver Figura 4. Cada uno de ellos se encuentra constituido por dos sectores divididos por la avenida universitaria. El sector de la parte alta, formado por terrenos ubicados al costado oriental de la vía y el sector de la parte baja hacia el costado occidental de la misma (Amaya, 2019).

**Figura 4. Distritos de drenaje Zona Nororiental**



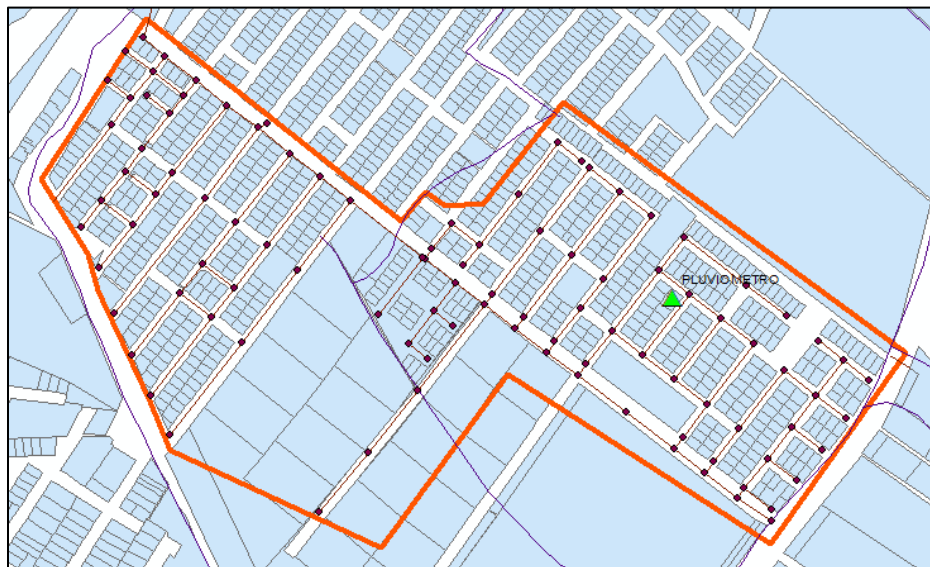
**Fuente:** Proactiva Aguas de Tunja S.A.E.S.P. (2017).

### 3.1.3. Base Topológica Red de Drenaje Distrito Santa Inés

Una vez realizadas las actividades de inspección, catastro de redes, verificación de conectividad del sistema, identificación de pozos iniciales, se procedió a ejecutar la delimitación del distrito Santa Inés (Amaya, 2019).



Figura 5. Cuenca Urbana Delimitada Red de Drenaje Santa Inés



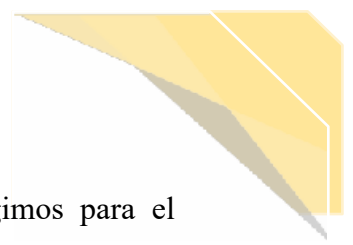
Fuente: Amaya Tequia, W.E. (2019). Modelización Hidráulica de Drenaje Urbano. Aplicación Sector Nororiental Distrito Santa Inés Tunja – Boyacá. Universidad Santo Tomás, Tunja.

Se lleva a cabo la selección de puntos teniendo en cuenta la ubicación de la red ya que el primer punto (PATP 3955) se encuentra en la parte inicial de la red tomando la distribución de la zona oriental, el segundo punto (PATP 3910) toma la zona occidental y finalmente el punto final (PATP 4091) toma el recorrido total finalizando la red.

Figura 6. Elección Puntos Toma de Muestras



Fuente: Adaptación propia con imágenes de Google Maps., junio de 2018.



Las Figura 7 Figura 8 y Figura 9 muestran estos puntos que escogimos para el respectivo análisis ya en campo.

**Figura 7. Punto #1. PATP 3955**



**Fuente:** Adaptación propia con imágenes de Google Maps., Junio de 2018

**Figura 8. Punto #2. PATP 3910**

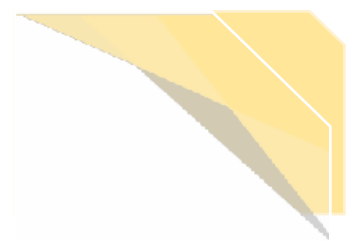


**Fuente:** Adaptación propia con imágenes de Google Maps., Junio de 2018.

**Figura 9. Punto #3. PATP 4091**

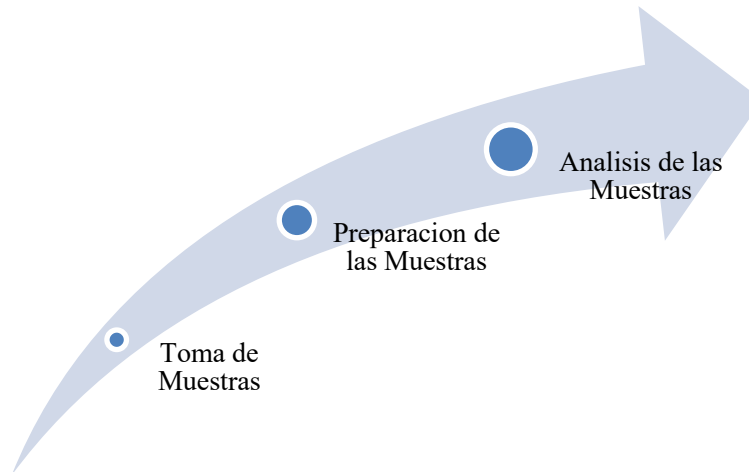


**Fuente:** Adaptación propia con imágenes de Google Maps., Junio de 2018.



### 3.2. Toma de Muestras (Ministerio de Ambiente y Agua, 2015)

Figura 10. Metodología Análisis de Muestras de Agua.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2018

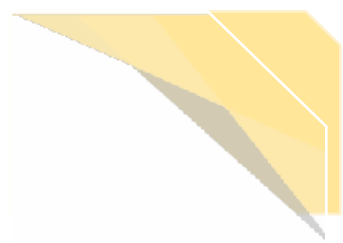
Para evitar errores es fundamental que las personas que tomen muestras tengan conocimiento sobre el proceso del muestreo.

#### 3.2.1. Lugar

Teniendo en cuenta la zona de estudio, ubicada en el barrio Santa Inés de la ciudad de Tunja se llevó a cabo el muestreo en 3 puntos representativos de este barrio. Para lo anterior se tuvo en cuenta que contara con el suficiente espacio para obtener el agua asegurando que en este lugar el recipiente de la muestra no toque fondo o las paredes del pozo, debido a que existe una concentración de sedimentos en el fondo del pozo que al ser muestreados no reflejan la situación real de las características del agua que fluye por los colectores, generando una concentración muy alta en los resultados.

#### 3.2.2. Tiempo

Se proponen las fechas teniendo en cuenta los pronósticos realizados por el IDEAM en los días en los que se presentan lluvias y periodos secos para realizar una comparación en el cambio de los parámetros medidos teniendo en cuenta estas condiciones. Siendo un factor determinante para el desarrollo de la investigación ya que estos pronósticos no son 100% confiables.



**Tabla 5. Horario Establecido para la Toma de Muestras del Periodo Seco.**

Punto N° 1		Punto N° 2	
Fecha	Hora	Fecha	Hora
12 – 13 Julio	11:00 – 16:00	12 – 13 Julio	11:00 – 16:00
	17:00 – 22:00		17:00 – 22:00
	23:00 – 04:00		23:00 – 04:00
	05:00 – 10:00		05:00 – 10:00

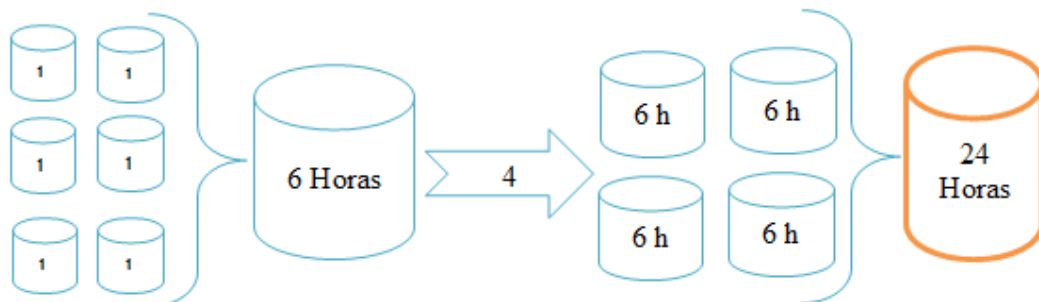
Punto N° 3	
Fecha	Hora
12 – 13 Julio	11:00 – 16:00
	17:00 – 22:00
	23:00 – 04:00
	05:00 – 10:00

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2018

### 3.2.3. Frecuencia

Se realizo un muestreo compuesto durante 24 horas continuas, este consistía en cuatro muestras compuestas de seis muestras simples con frecuencia de una hora.

**Figura 11. Frecuencia de la Toma de Muestras.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2018

Se lleva a cabo un registro de datos de la toma de muestras como el que se muestra a continuación, para así poder marcar cada uno de los recipientes y evitar algún error.

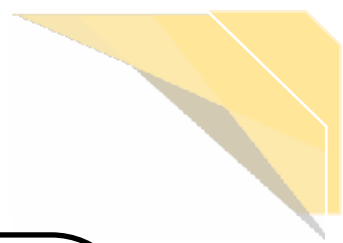




Figura 12. Formato de Registro de Toma de Muestras.



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
 T U N J A

**PROACTIVA**  
Tunja  


**Toma de Muestra N°:** \_\_\_\_\_

**Fecha de Toma de muestra:** \_\_\_\_\_

**Ensayo Realizado:** \_\_\_\_\_

**Tipo de Agua:** \_\_\_\_\_

**Punto de Toma:** \_\_\_\_\_

**Tipo de Muestreo:** \_\_\_\_\_

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., febrero de 2018

Las muestras de agua contaminada (aguas lluvia – aguas residuales “Aguas Combinadas”) se recolectaron con el apoyo de la empresa PROACTIVA, siguiendo los protocolos de conservación y almacenamiento exigidos por la norma técnica.

Tabla 6. Requerimientos para Preservación y Almacenamiento de Muestras de Agua

Parámetro	Conservación	Máximo Almacenamiento
Cloruros (mg/L)	No requiere	28 días
DBO (mg/L)	Refrigeración	48 horas
DQO (mg/L)	Analizar lo más pronto posible	28 días
Oxígeno Disuelto	Analizar inmediatamente	0.25 horas
Ph	Analizar inmediatamente	0.25 horas
Solidos Suspendidos (mg/L)	Refrigeración	7 días
Sulfatos (mg/L)	Refrigeración	28 días
Sulfuros (mg/L)	Refrigeración	28 días

Fuente: IDEAM, Toma de muestra de Aguas Residuales.

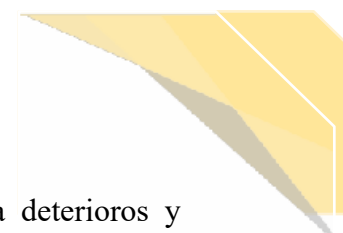
### 3.3. Análisis de Muestras

El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio-ALLCHEM CIA LTDA; dedicado a la prestación de servicio de apoyo a la industria colombiana especialistas en análisis físico-químico y microbiológico de agua y alimentos de consumo humano y pecuario. Además, cuenta con acreditación del IDEAM, (Resolución 2458 del 11 de noviembre de 2015). Los parámetros analizados fueron:

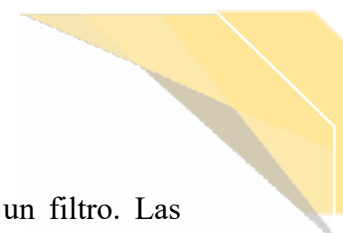
MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DEL DRENAJE URBANO, EN SOFTWARE SWMM,  
 SECTOR NORORIENTAL - SANTA INÉS - TUNJA.

MYLP | Ingeniera Civil  
 Msc Hidroambiental

54



- Cloruros: El ion  $Cl^-$  (cloruro) es altamente corrosivo y da lugar a deterioros y picaduras en tuberías y sistemas de distribución de aguas, así mismo, y en función de su contenido de pH del agua y otros iones presentes en ella, puede degradar los hormigones (Universidad de Jaen, 2016).
- DBO: La Demanda Bioquímica de Oxígeno mide la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. En esta se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que es biodegradable, midiendo el grado de contaminación. Siendo un proceso biológico que requiere tiempo y se realiza a  $20^{\circ}C$  durante 5 días (Microlab Industrial, 2015).
- DQO: La Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica por medios químicos y convertirla en  $CO_2$  y  $H_2$ . Busca la oxidación completa de la muestra, de manera que todo el material orgánico es químicamente oxidado. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua y su prueba toma alrededor de 3 horas (Microlab Industrial, 2015).
- Oxígeno Disuelto: El agua residual frecuentemente contiene material orgánico que es descompuesto por microorganismos, que utilizan el oxígeno en los procesos. (La cantidad de oxígeno consumida por estos organismos en el rompimiento de los residuos se conoce como demanda bioquímica de oxígeno o DBO. Se establece como la concentración actual (mg/L) o como la cantidad de oxígeno que puede tener el agua a una temperatura determinada. Se conoce también como el porcentaje de saturación y dado que evita la formación de olores desagradables en las aguas residuales, es deseable y conveniente disponer de cantidades suficientes de oxígeno (CIMCOOL, 2004).
- pH: La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de 5 a 9, un pH menor a este se conoce como un agua ácida y da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales. Además de esto es más fácil tratar por métodos biológicos aguas con un pH entre 6,5 a 8,5 (Espigares & Perez)
- Sólidos Suspendidos: En el agua que se encuentra en la naturaleza se pueden encontrar varias impurezas de forma suspendida o disuelta. En la cuantificación de los niveles de impurezas, el término sólido en suspensión describe las partículas en suspensión presentes en una muestra de agua. Prácticamente, estas partículas se definen



por su imposibilidad de ser separadas de la muestra de aguas usando un filtro. Las partículas más pequeñas, incluyendo especies conteniendo cargas iónicas, se refieren como sólidos disueltos (Withman College, 2011).

- Sulfatos: El origen de los sulfatos se debe fundamentalmente a los procesos de disolución de las tizas, existentes en el terreno, en el agua subterránea. El sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia ya que Al moverse el agua a través de formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados, una parte del sulfato se disuelve en las aguas subterráneas (Lenntech, 2003).
- Sulfuros: Su presencia en aguas residuales proviene en gran parte de la descomposición de la materia orgánica, algunas veces de desechos industriales. La mayoría proviene de la reducción bacteriana del sulfato. El sulfuro de hidrógeno que pasa al aire desde las aguas residuales que lo contienen, causa problemas de malos olores (Espigares & Perez).

### 3.4. Modelación en EPA – SWMM

El modelo de gestión de aguas pluviales de la EPA SWMM es una lluvia dinámica modelo de simulación de escorrentía que calcula la cantidad y calidad de escorrentía principalmente en áreas urbanas. Este opera en una colección de las áreas de subcaptación que reciben precipitación y generan escorrentía y cargas contaminantes. La parte del enrutamiento transporta esta escorrentía a través de un sistema de tuberías, rastreando la calidad de la escorrentía generada dentro de cada subcaptación y la calidad del agua en cada tubería durante un periodo de simulación compuesto por múltiples pasos de tiempo (Environmental Protection Agency, United States, 2009).

#### 3.4.1. Escorrentía Posterior al Desarrollo.

Se construye un modelo hidrológico de la captación de una ciudad y se compara con la escorrentía de aguas pluviales en el desarrollo previo y posterior ilustrando el proceso dividiendo espacialmente una cuenca en pequeñas unidades computacionales, llamadas subcategorías en donde a cada una se le asignan las características correspondientes (Environmental Protection Agency, United States, 2009).



### 3.4.2. Hidráulica de Drenaje en Superficie.

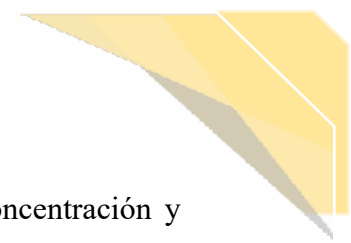
Los elementos hidráulicos y los métodos de enrutamiento de flujo se utilizan para modelar un drenaje de su sistema, en donde se agrega una red de transporte al modelo de pos desarrollo integrado en el desarrollo de la esorrentía y se dimensiona pasando los eventos de tormenta con periodos de retorno. Este estudio fue basado en los hidrogramas de alcantarillado reales medidos en la descarga principal de la cuenca urbana y calibrado con parámetros asociados a las pérdidas iniciales hidrológicas y coeficientes de rugosidad; adoptando como criterio de validación que el caudal pico, tiempo pico y volumen total de descarga fueran inferiores al 20%. Dando como recomendación realizar la calibración y reconstrucción de los aliviaderos, teniendo en cuenta que con el estudio se pudo establecer un alto ingreso de caudal pluvial al interceptor que conduce aguas residuales, indicando una condición desfavorable en su operación (Amaya, 2019).

### 3.4.3. Calidad del Agua de Esorrentía.

Se demuestra como simular la acumulación y el lavado de contaminantes en una cuenca urbana. Se considera la influencia de los diferentes usos de la tierra en la acumulación de contaminantes y las concentraciones medias de eventos como las funciones exponenciales se utilizan para representar el proceso de lavado. La calidad de la esorrentía superficial es un problema extremadamente importante, pero muy complejo en el estudio de flujos de clima húmedo y su impacto ambiental. SWMM proporciona un conjunto flexible de funciones matemáticas que pueden calibrarse para estimar la acumulación de contaminantes en la superficie terrestre durante los periodos de clima seco y su liberación de la esorrentía durante los eventos de tormenta (Seco & Gomez, 2011).

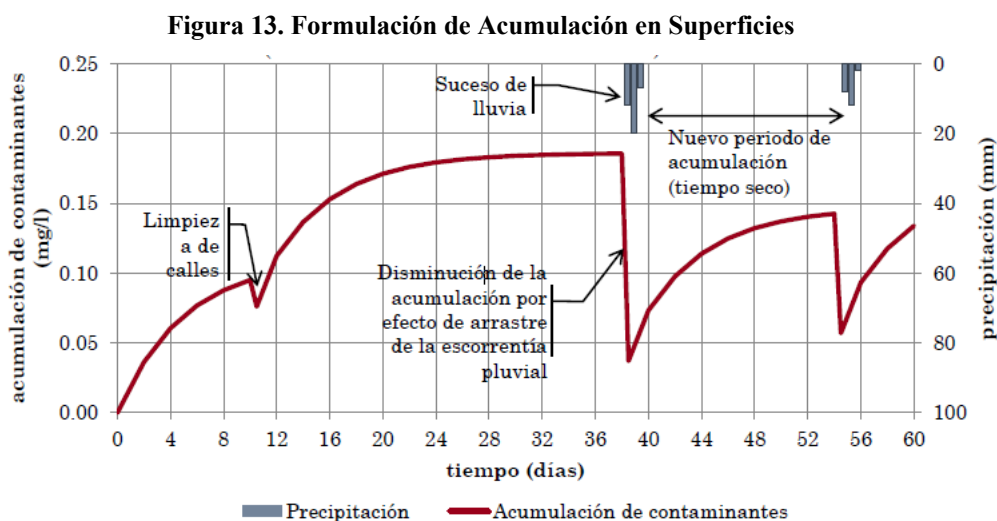
Representación del Sistema: SWMM emplea varios objetos y métodos especializados para representar la calidad del agua en esorrentía urbana. Estas herramientas pueden modelar una variedad de acumulación y procesos de lavado, pero deben estar respaldados por datos de calibración para generar resultados reales (Seco & Gomez, 2011).

- Contaminantes: Son definidos por el usuario que se acumulan en la superficie de captación y son lavados y transportados aguas abajo durante los eventos de esorrentía. SWMM puede simular la generación, lavado y transporte de cualquier número de estos.

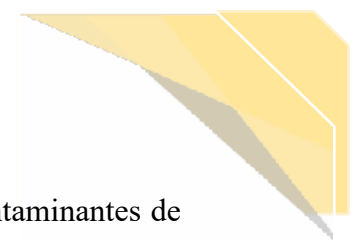


Cada contaminante definido se indica por su nombre y unidades de concentración y calcula internamente las concentraciones generadas por la escorrentía. También se puede definir una dependencia entre concentraciones de dos contaminantes usando la opción de contaminantes y fracciones mixtas (por ejemplo, el plomo puede ser una fracción constante de concentración de sólidos suspendidos).

- Usos de la Tierra: Se caracterizan las actividades dentro de una subcaptación que afecta la generación de contaminantes de manera diferente, se representa la variación espacial en las tasas de acumulación / lavado de contaminantes, así como el efecto de limpieza de calles dentro de una subcuenca (si se usa) dentro de una subcuenca. Esta división se realiza independientemente para subáreas permeables e impermeables.
- Acumulación: Esta función para un uso dado de la tierra especifica la velocidad a la que un contaminante es agregado a la superficie de la tierra durante los periodos de clima seco que estarán disponibles para lavado durante un evento de segunda vuelta. La acumulación total se expresa en masa por unidad de área o masa por unidad de longitud. Se pueden definir tasas de acumulación separadas por cada contaminante y uso de la tierra. Las opciones proporcionadas por SWMM: función de potencia, función exponencial y función de saturación. Estas se pueden adaptar, utilizando los parámetros adecuados, para lograr varios tipos de comportamiento de acumulación, como una acumulación de tasa lineal o de tasa decreciente.



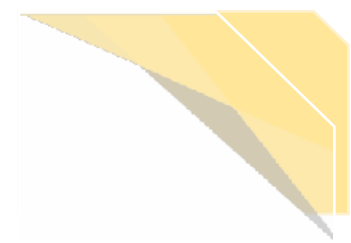
Fuente: Seco, Irene, & Gomez, Manuel.



- Lavado: Es el proceso de erosión, movilización y/o disolución de contaminantes de una superficie de subcaptación durante eventos de clima húmedo. Hay tres opciones disponibles en SWMM para representar este proceso para cada contaminante y uso de la tierra: concentración media del evento, curvas de clasificación y funciones exponenciales. La principal diferencia de estas funciones es:
  - Concentración media del evento asume que cada contaminante tiene una concentración de escorrentía constante en toda la simulación.
  - Las curvas de clasificación producen cargas de lavado que son funciones de la tasa de escorrentía solamente, lo que significa que simulan el mismo lavado bajo la misma descarga independientemente del tiempo de la tormenta donde ocurra la descarga.
  - Las curvas exponenciales difieren de las curvas de clasificación en que la carga de lavado es una función de la tasa de escorrentía y de la cantidad de contaminante restante en la cuenca.
  - Las funciones de acumulación no son necesarias para las concentraciones medias del evento o curvas de clasificación para representar las concentraciones de contaminantes. Si se utilizan estas funciones, independientemente de la de lavado, la acumulación se agota continuamente como lavado y cesa cuando ya no queda más acumulación.
  - Debido a que las curvas de clasificación no utilizan la cantidad de acumulación restante como factor limitante, tienden a producir mayor carga contaminante al final de un evento de lluvia que las curvas exponenciales que tienen en cuenta la cantidad de acumulación restante en la superficie. Esta diferencia puede ser importante para grandes eventos de lluvia donde gran parte de la acumulación puede ser lavado en las primeras etapas.

Después de que los contaminantes se lavan de la superficie, ingresan al sistema y se transportan a través de los conductos según lo determinado por los resultados de flujo. Se pueden experimentar descomposición de primer orden o reducción en nodos específicos donde se definan funciones de tratamiento (Seco I. , 2016).

- Reducción de Contaminantes de la Superficie Terrestre: SWMM dispone de dos



procedimientos para reducir la carga de contaminantes superficiales.

- Tratamiento de BMP: Supone que algún tipo de BMP (Best Management Practices – Practicas Optimas de Gestión) ha sido usado en la captación que reduce su carga normal de lavado por una fracción de remoción constante.
- Barrido de Calles: Se puede definir para cada uso de la tierra y es simulado en paralelo con la acumulación antes del comienzo de la primera tormenta y entre los próximos eventos. El barrido está definido por cuatro parámetros utilizados para calcular la carga contaminante que queda en la superficie durante una tormenta: días entre barrido de calles, fracción de la acumulación que está disponible para eliminación mediante barrido, número de días desde la última vez del barrido a comienzo de la simulación y eficiencia de barrido de calles en porcentaje. Estos parámetros se definen para cada uso de la tierra mientras el ultimo se define para cada contaminante.

### 3.5. Sulfuro de Hidrogeno

#### 3.5.1. Caracterización Hidráulica

La caracterización hidráulica del alcantarillado es necesaria para hacer la correlación entre las concentraciones de sulfuro existentes y las obtenidas por la ecuación para la predicción de sulfuro. La caracterización hidráulica requiere la medición de la velocidad, la profundidad del flujo y la pendiente del alcantarillado. La velocidad y la profundidad del flujo se obtienen en el momento del muestreo de los sulfuros. La velocidad puede medirse por varios métodos, entre ellos la velocidad de flotación. La pendiente de la alcantarilla puede medirse sobre el terreno o tomarse en forma de planos construidos. El coeficiente de rugosidad hidráulica real, n, puede calcularse utilizando la ecuación de Manning (American Concrete Pipe Association, 1998):

$$n = \frac{1,486 R^{2/3} S^{1/2}}{V}$$

**Ecuación 3. Formula de Manning**

Donde:

V: Velocidad promedio ft/s.

S: Pendiente

R: Radio Hidráulico ft.

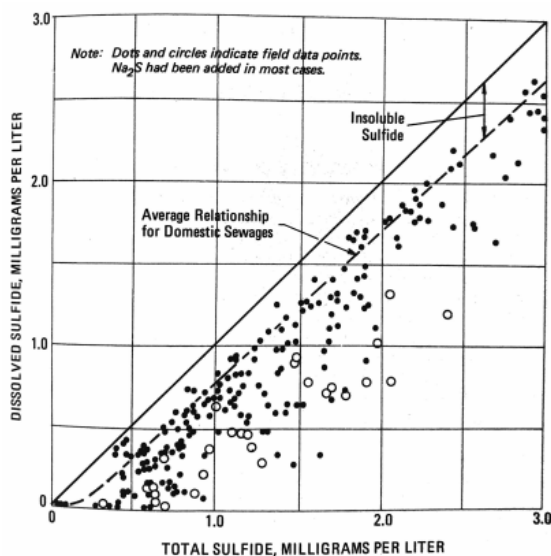
n: Coeficiente de Rugosidad de Manning



### 3.5.2. Caracterización de las Aguas Residuales.

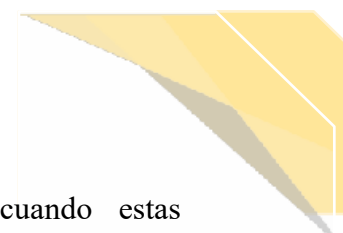
Es necesario controlar parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno; pH; temperatura; oxígeno disuelto y Sulfato; las concentraciones pueden medirse mediante pruebas de laboratorio individuales o compuestas. Al comienzo del ensayo se miden tanto el sulfuro total como el disuelto. Para cada flujo de aguas residuales, hay una diferencia relativamente constante entre el total y el sulfuro disuelto. Una vez que se determina esta diferencia, entonces sólo se debe medir el sulfuro total. La Figura 14 es un diagrama que muestra de la medición de sulfuro en donde se indican las diversas relaciones de sulfuro. Los valores medios diarios de la concentración de sulfuro y el pH pueden calcularse aplicando un factor de corrección, derivado del gráfico de variación diurna de sulfuro, a las concentraciones de sulfuro medidas durante un día (American Concrete Pipe Association, 1998).

Figura 14. Comparación de las Concentraciones de Sulfuros Totales y Disueltos en los Alcantarillados



Fuente: American Concrete Pipe Association (1998). Concrete Piper Handbook. United States of America.

Los resultados de la primera toma de muestras y mediciones pueden indicar que la cloaca está libre de sulfuro. Puesto que el objetivo es determinar la característica de acumulación de sulfuro, el sulfato de sodio en una solución diluida puede introducirse en la alcantarilla por encima de la primera estación de muestreo y repetir el procedimiento de prueba. Utilizando el método colorimétrico, puede ser necesario realizar uno o más ensayos en la



primera estación para obtener la concentración exacta de sulfuro cuando estas concentraciones sean superiores a 1,5 mg/litro. La sonda de iones de sulfuro proporciona valores precisos en todas las concentraciones de sulfuro.

Dado que la velocidad es uno de los factores determinantes de la generación de sulfuros, es posible que las tres condiciones de sulfuros descritas anteriormente existan en una tubería en algún momento durante un período de 24 horas. Por lo tanto, para fines de definición, las tres categorías que definen las características de generación de sulfuro de una tubería se basan en la velocidad promedio para el período máximo de flujo de 6 horas.

Se deben hacer suficientes pruebas para determinar el  $DBO_5$  promedio durante el período de flujo máximo de 6 horas. El  $DBO_5$  del afluente de la planta de tratamiento será suficiente si sus características son similares a las del efluente de la alcantarilla bajo prueba. Si se utilizan cifras compuestas de 24 horas el  $DBO_5$  máximo para un periodo de 6 horas puede obtenerse con suficiente precisión añadiendo un 25% al valor de 24 horas (American Concrete Pipe Association, 1998).

### 3.5.3. Predicción de Sulfuro.

El propósito del estudio de la acumulación de sulfuro en una alcantarilla existente es predecir las condiciones en una nueva alcantarilla. En la Tabla 7 y en la Figura 15 se muestra un ejemplo de los datos recogidos en un estudio. Estos datos se utilizan para calcular los niveles totales de sulfuro previstos que luego se comparan con los valores reales. La curva de acumulación de sulfuros puede aplicarse directamente para diseñar una nueva alcantarilla siempre que la pendiente, el diámetro y otros factores sean similares.

Debido a las numerosas variables asociadas a una unión, es difícil desarrollar una expresión matemática generalizada para el efecto que las uniones pueden tener sobre la acumulación de sulfuros en una nueva línea. Sin embargo, es importante señalar que las uniones disminuyen los niveles de sulfuro debido a los efectos de la turbulencia añadida y la dilución de los afluentes de menor nivel de sulfuro (American Concrete Pipe Association, 1998).

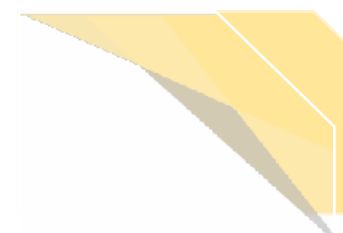
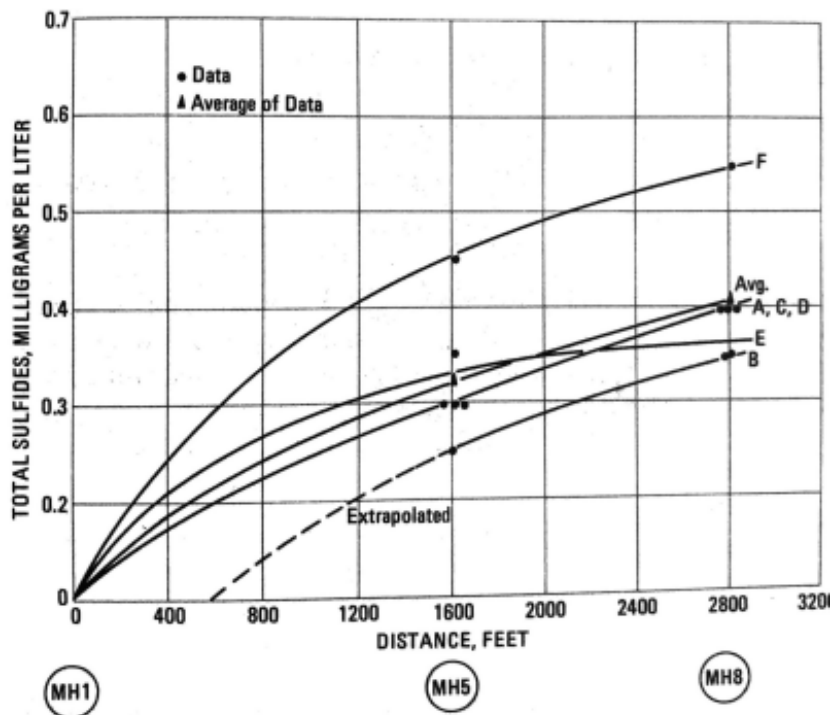


Tabla 7. Ejemplo de Datos de Correlación

Punto	d/D	R/R <sub>f</sub>	A/A <sub>f</sub>	b/D	P/P <sub>f</sub>	V/V <sub>f</sub>	R (ft)	A (ft <sup>2</sup> )	b (ft)
A	0,54	1,05	0,54	0,98	0,52	1,05	0,394	0,956	1,47
B	0,55	1,06	0,57	0,99	0,54	1,06	0,398	1,010	1,49
C	0,55	1,05	0,56	0,99	0,53	1,06	0,394	0,990	1,49
D	0,51	1,01	0,52	0,99	0,51	1,01	0,379	0,920	1,49
E	0,53	1,04	0,53	0,99	0,52	1,03	0,390	0,938	1,49
F	0,53	1,02	0,53	0,99	0,52	1,03	0,383	0,938	1,49
Punto	P (ft)	V (ft/s)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	T (°C)	pH	OD (mg/l)	Sulfuro Total (mg/l)	Sulfuro Disuelto (mg/l)
A	2,45	1,55	130	92	26	7,7	< 0,5	0,3	0,25
B	2,54	1,57	130	92	27	7,7	< 0,5	0,25	0,15
C	2,50	1,57	130	92	27,2	7,5	< 0,5	0,3	0,25
D	2,40	1,49	130	92	27	7,55	< 0,5	0,3	0,25
E	2,45	1,52	130	92	27,1	7,5	< 0,5	0,25	0,15
F	2,45	1,52	130	92	27	7,5	< 0,5	0,45	0,25

Fuente: American Concrete Pipe Association (1998). Concrete Piper Handbook. United States of America.

Figura 15. Datos de Correlación de Sulfuros Totales.



Fuente: American Concrete Pipe Association (1998). Concrete Piper Handbook. United States of America.

### 3.5.4. Ecuaciones Predictivas

El Manual de la EPA de 1974 proporciona ecuaciones para el análisis cualitativo de la capacidad de generación de sulfuros. Estas ecuaciones son:



- Tasa de producción de sulfuro por la capa de lodo.
- Ganancias y pérdidas de oxígeno en aguas residuales.
- El consumo de oxígeno en las alcantarillas.
- Reacción del sulfuro con el oxígeno.
- Escape de sulfuro de hidrógeno a la atmósfera.

El objetivo de estas ecuaciones y conceptos es el desarrollo de un modelo general para la acumulación de sulfuros. Las ecuaciones predictivas para la acumulación de sulfuros fueron completadas por Pomeroy y Parkhurst, publicadas en *Progress In Water Technology* en 1977 e incorporadas en el Manual de la EPA de 1958. Las ecuaciones predicen la acumulación de sulfuro de hidrógeno en una alcantarilla llena de partidos en un tiempo infinito. *La concentración de sulfuro predicha es el pico de sulfuro total generado durante el año.*

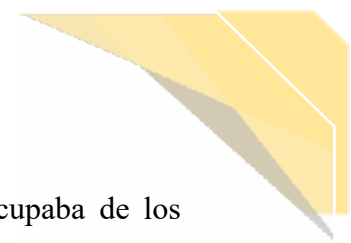
El método cuantitativo de Pomeroy y Parkhurst para la predicción de sulfuros ha demostrado su eficacia en estudios realizados en California, Luisiana y Texas. El método fue desarrollado, y es aplicable, sólo para alcantarillas de aguas residuales de tronco parcialmente lleno cuando las condiciones son favorables para la acumulación de sulfuros. Dado que pueden obtenerse resultados engañosos en otras condiciones, se evalúan los indicadores para determinar si existe la posibilidad de generación de sulfuros antes de utilizar el método Pomeroy/Parkhurst (American Concrete Pipe Association, 1998).

#### 3.5.5. Indicadores de Generación de Sulfuros.

El método de análisis recomendado consiste en evaluar la Fórmula Z y las Curvas A/B. Si alguno de los indicadores muestra que las condiciones son favorables para la generación de sulfuros, se utiliza el método de Pomeroy/Parkhurst para determinar si existe un problema real. Si ambos indicadores no muestran ningún potencial para la generación de sulfuros, entonces no se requiere ningún otro análisis (American Concrete Pipe Association, 1998).

#### 3.5.6. Formula Z

La primera ecuación para expresar las condiciones necesarias para la generación de sulfuro



en las redes de gravedad fue desarrollada en 1946. Esta fórmula no se ocupaba de los niveles de sulfuro, sino simplemente de si podía producirse una acumulación de sulfuro. En 1950, Davy presentó una fórmula más completa que relacionaba el número de Reynolds, efectividad de DBO<sub>5</sub>, el área de la sección transversal del flujo y el ancho de la superficie. Este trabajo fue posteriormente modificado por Pomeroy para desarrollar lo que se conoce como la fórmula Z (American Concrete Pipe Association, 1998):

$$Z = \frac{e\text{DBO}}{S^{0,50} Q^{0,33}} \times \frac{P}{b}$$

**Ecuación 4. Generación de Sulfuros**

Donde:

Z: Función definida

Q: Caudal, (ft<sup>3</sup>/s)

eDBO: DBO<sub>5</sub> efectivo, (mg/l)

P: Perímetro mojado, (ft)

S: Pendiente

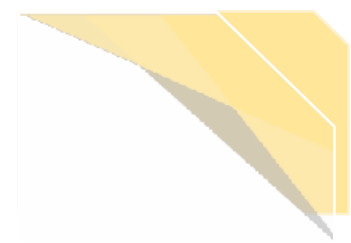
b: Ancho, (ft)

El valor de Z obtenido se interpreta de la siguiente manera:

**Tabla 8. Interpretación Valores de Z**

Valor de Z	Condición de Sulfuro
Z < 5.000	El sulfuro raramente se produce
5.000 ≤ Z ≤ 10.000	Condición secundaria para la acumulación de sulfuro
Z > 10.000	La acumulación de sulfuro es común

Fuente: American Concrete Pipe Association (1998). Concrete Piper Handbook. United States of America.



## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Configuración del Modelo.

#### 4.1.1. Definición del contaminante.

Se llevó a cabo la toma de muestra durante 24 horas en un periodo seco y un periodo de lluvia en los puntos establecidos. Durante los muestreos se realizó la toma de parámetros in situ como pH, temperatura y porcentaje de oxígeno disuelto y se llevaron las respectivas muestras al laboratorio establecido para el análisis de los demás parámetros.

**Figura 16. Toma de muestra en el Punto #1. PATP 3955 en Periodo Seco.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Julio de 2018.

**Figura 17. Toma de muestra en el Punto #1. PATP 3955 en Periodo de Lluvia.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Marzo de 2019.

**Tabla 9. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3955.**

Análisis Realizado	Métodos	Técnicas	Unidades	Resultado Periodo Seco	Resultado Periodo de Lluvia
<b>DBO-5</b>	SM5210 B	Electrométrico	mg <sub>O2</sub> /L	315,6	96
<b>DQO</b>	SM 5220 B	Titulación	mg <sub>O2</sub> /L	522,16	481
<b>Cloruros</b>	SM 4500-CL-D	Electrométrico	mg <sub>Cl</sub> /L	60,69	52,0
<b>pH</b>	SM 4500-H-B	Electrométrico	Unidad	6,94	7,96
<b>SST</b>	SM 2540-D	Gravimétrico	mg/L	132,5	86,0
<b>Sulfatos</b>	SM 4500-SO4-E	Turbidimetria	mg <sub>SO4</sub> /L	61,90	68,9
<b>Sulfuros</b>	SM 4500 S2-F	Yodimetria	mg <sub>S</sub> /L	<4	350

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

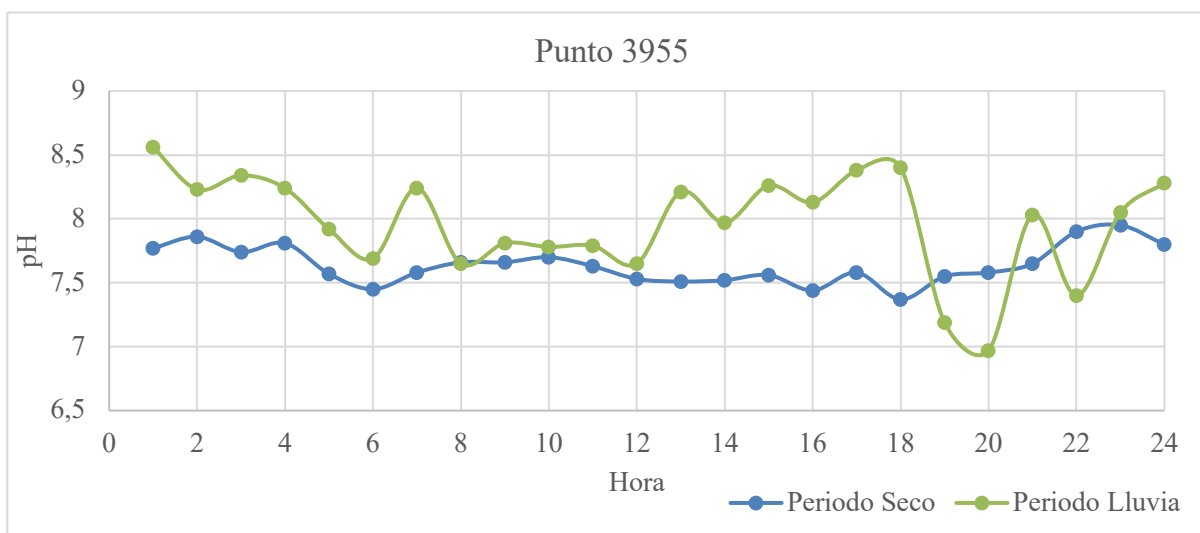


Tabla 10. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 3955

Hora	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia
	pH		T (°C)		OD (mg/L)	
1	7,77	8,56	18,94	18,50	3,27	2,72
2	7,86	8,23	19,60	19,90	3,35	2,73
3	7,74	8,34	19,20	19,60	3,60	2,95
4	7,81	8,24	18,80	20,60	1,12	2,74
5	7,57	7,92	18,50	20,90	3,16	2,36
6	7,45	7,69	18,00	20,30	3,60	2,83
7	7,58	8,24	17,70	19,70	1,18	2,54
8	7,66	7,65	16,90	19,50	1,02	2,14
9	7,66	7,81	16,31	18,70	0,67	3,62
10	7,70	7,78	16,20	19,40	0,78	2,73
11	7,63	7,79	16,20	18,70	0,98	2,76
12	7,53	7,65	16,06	18,10	3,71	3,58
13	7,51	8,21	16,32	18,60	0,48	2,68
14	7,52	7,97	16,23	18,40	0,31	2,31
15	7,56	8,26	15,85	18,50	0,47	2,07
16	7,44	8,13	15,75	17,40	0,66	1,52
17	7,58	8,38	16,52	17,60	3,84	1,16
18	7,37	8,40	17,00	17,50	0,59	1,55
19	7,55	7,19	17,61	17,20	2,91	1,30
20	7,58	6,97	18,24	16,30	3,06	0,90
21	7,65	8,03	19,04	15,80	1,54	1,00
22	7,90	7,40	18,90	17,10	1,50	1,18
23	7,95	8,05	19,22	18,30	2,12	2,62
24	7,80	8,28	19,50	18,80	1,50	2,13

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

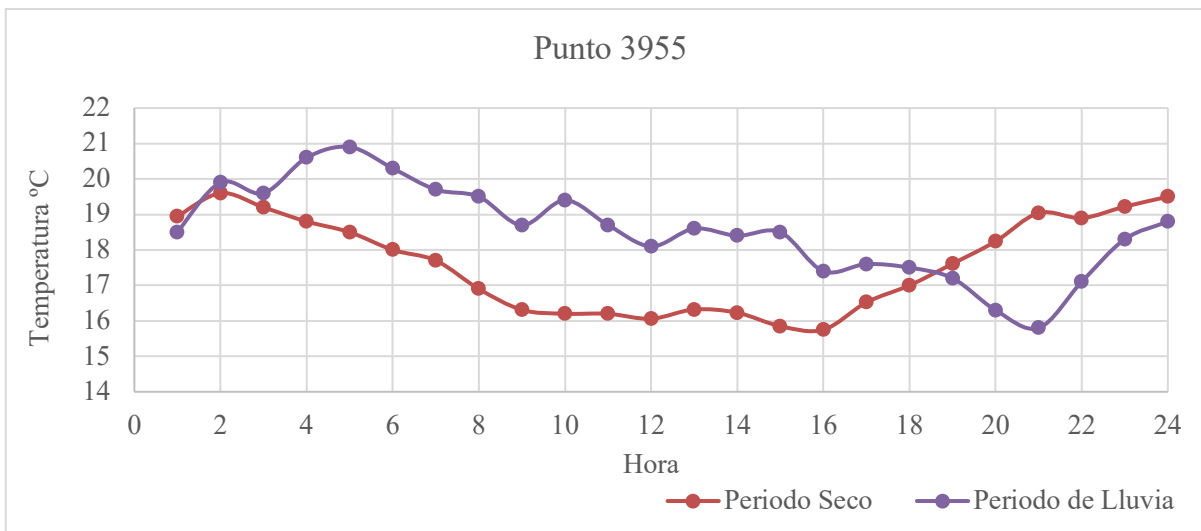
Grafica 1. Resultados pH en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.



**Grafica 2. Resultados Temperatura en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

**Grafica 3. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 3955 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.**  
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

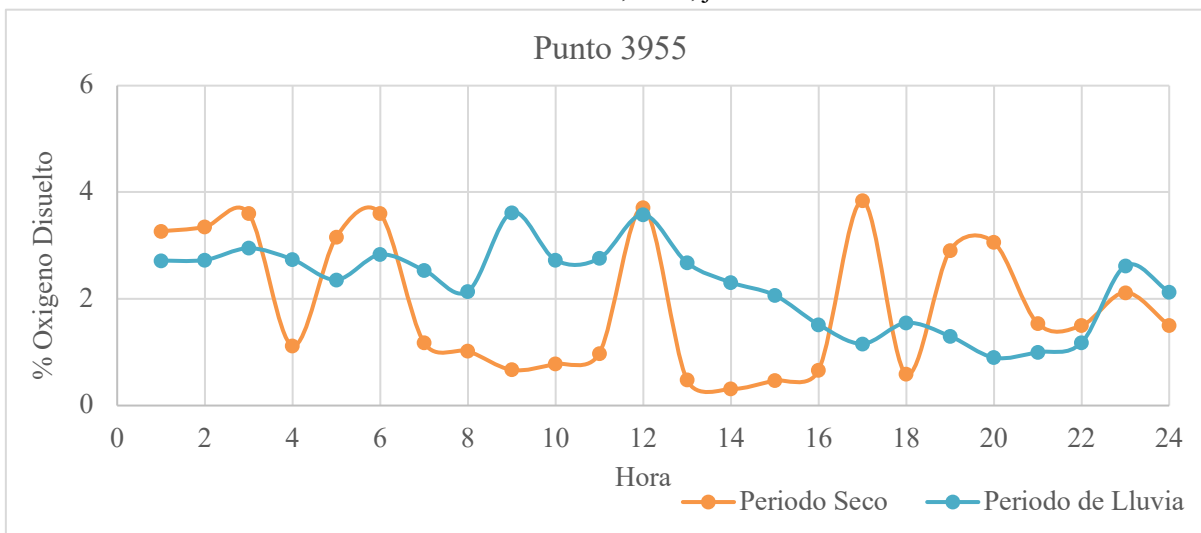




Figura 18. Toma de muestra en el Punto #2. PATP 3910 en Periodo Seco.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Julio de 2018.

Figura 19. Toma de muestra en el Punto #2. PATP 3910 en Periodo de Lluvia



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Abril de 2019.

Tabla 11. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3910.

Análisis Realizado	Métodos	Técnicas	Unidades	Resultados Periodo Seco	Resultados Periodo de Lluvia
DBO-5	SM5210 B	Electrométrico	mgO <sub>2</sub> /L	372,15	267
DQO	SM 5220 B	Titulación	mgO <sub>2</sub> /L	541,86	481
Cloruros	SM 4500-CL-D	Electrométrico	mgCl <sub>-</sub> /L	53,55	37
pH	SM 4500-H-B	Electrométrico	Unidad	6,89	8,10
SST	SM 2540-D	Gravimétrico	mg/L	115	85
Sulfatos	SM 4500-SO <sub>4</sub> -E	Turbidimetria	mgSO <sub>4</sub> /L	44,90	63,7
Sulfuros	SM 4500 S <sub>2</sub> -F	Yodimetria	mgs/L	<4	294

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Tabla 12. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 3910.

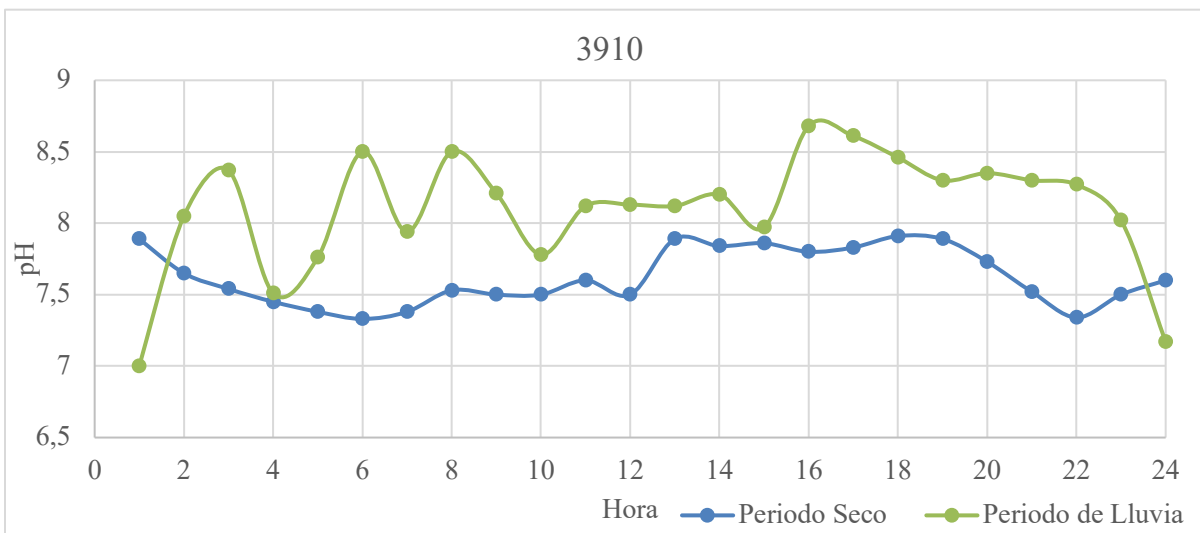
Hora	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia
	pH		T (°C)		OD (mg/L)	
1	7,89	7,00	17,55	17,40	3,67	5,92
2	7,65	8,05	17,22	20,10	3,55	3,78
3	7,54	8,37	17,30	20,00	3,55	3,86
4	7,45	7,51	17,40	20,60	3,77	3,42
5	7,38	7,76	17,50	21,00	4,00	3,33
6	7,33	8,50	17,60	19,80	3,85	3,67
7	7,38	7,94	17,50	20,90	3,91	4,47
8	7,53	8,50	17,90	19,20	3,99	3,62
9	7,50	8,21	17,80	18,50	3,31	4,78
10	7,50	7,78	17,30	18,60	3,75	4,72
11	7,60	8,12	17,40	19,00	3,85	3,66
12	7,50	8,13	17,03	18,30	1,69	3,84
13	7,89	8,12	16,67	18,60	1,45	3,80
14	7,84	8,20	16,70	16,10	1,58	3,88
15	7,86	7,97	15,95	17,90	1,54	3,47
16	7,80	8,68	15,62	17,80	1,72	2,97
17	7,83	8,61	15,07	16,90	1,16	4,81



Hora	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia
	pH		T (°C)		OD (mg/L)	
18	7,91	8,46	15,39	16,50	1,53	3,40
19	7,89	8,30	15,78	15,60	2,92	3,30
20	7,73	8,35	16,95	15,50	2,16	3,47
21	7,52	8,30	17,72	15,70	2,32	3,36
22	7,34	8,27	17,80	16,50	2,07	2,47
23	7,50	8,02	19,00	16,60	3,20	3,29
24	7,60	7,17	19,10	21,10	2,02	5,18

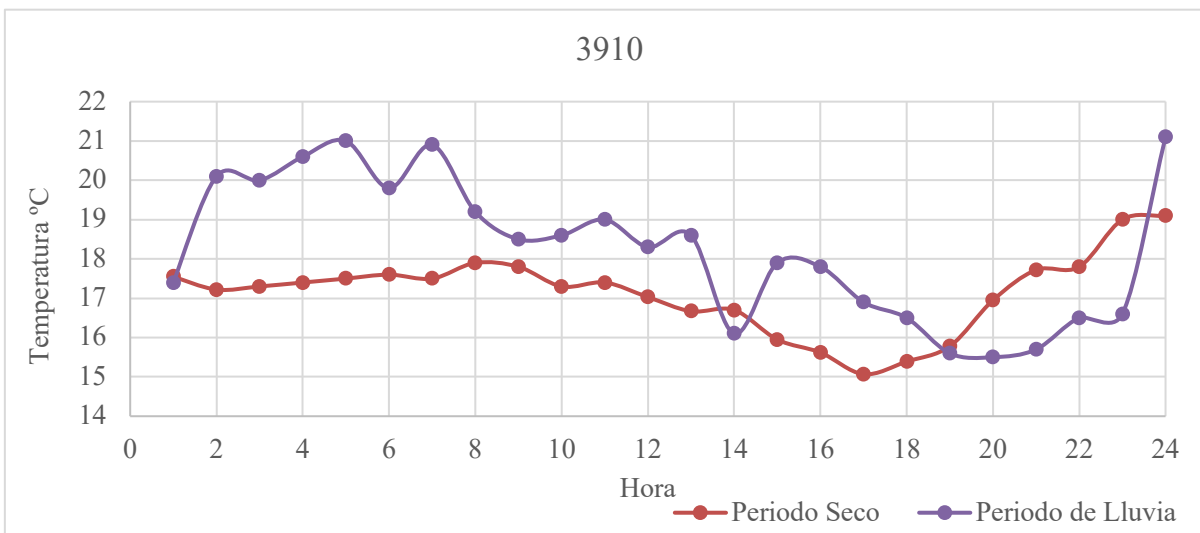
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Grafica 4. Resultados pH en el Punto 3910 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.



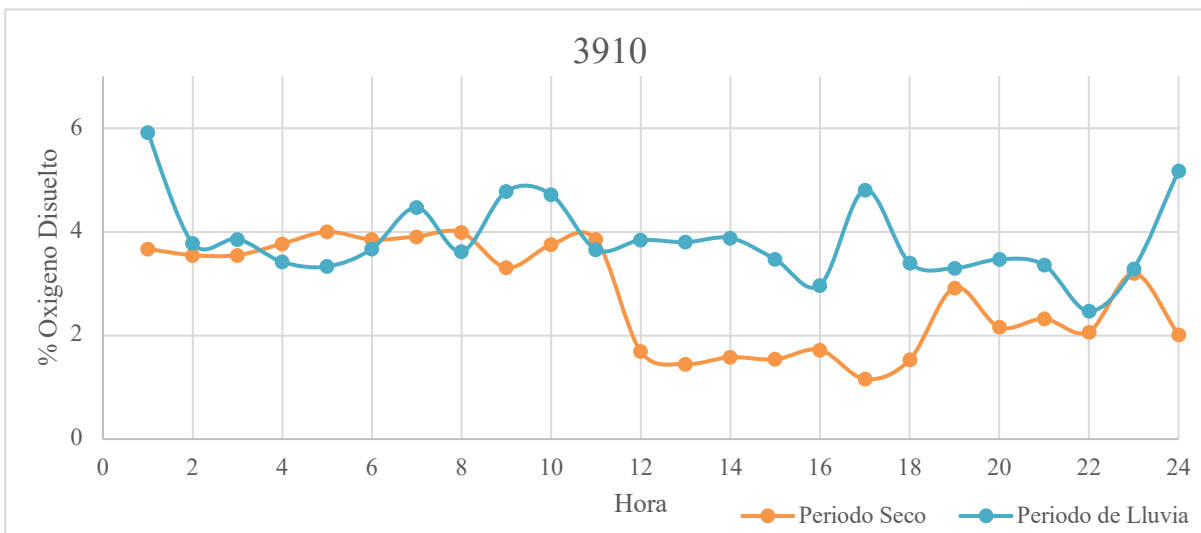
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Grafica 5. Resultados Temperatura en el Punto 3910 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Grafica 6. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 3910 Periodo Seco y Periodo de Lluvia.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Figura 20. Toma de muestra en el Punto #3. PATP 4091 en Periodo Seco.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Julio de 2018.

Figura 21. Toma de muestra en el Punto #3. PATP 4091 en Periodo de Lluvia.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., Marzo de 2019.

Tabla 13. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 4091.

Análisis Realizado	Métodos	Técnicas	Unidades	Resultados Periodo Seco	Resultados Periodo de Lluvia
DBO-5	SM5210 B	Electrométrico	mgO <sub>2</sub> /L	365,165	321
DQO	SM 5220 B	Titulación	mgO <sub>2</sub> /L	522,16	518
Cloruros	SM 4500-CL-D	Electrométrico	mgCl <sub>2</sub> /L	60,69	41
pH	SM 4500-H-B	Electrométrico	Unidad	7,04	7,04
SST	SM 2540-D	Gravimétrico	mg/L	117,5	30
Sulfatos	SM 4500-SO4-E	Turbidimetria	mgSO <sub>4</sub> /L	74,05	86,9
Sulfuros	SM 4500 S2-F	Yodimetria	mgS/L	<4	385

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

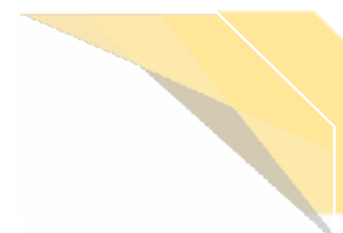
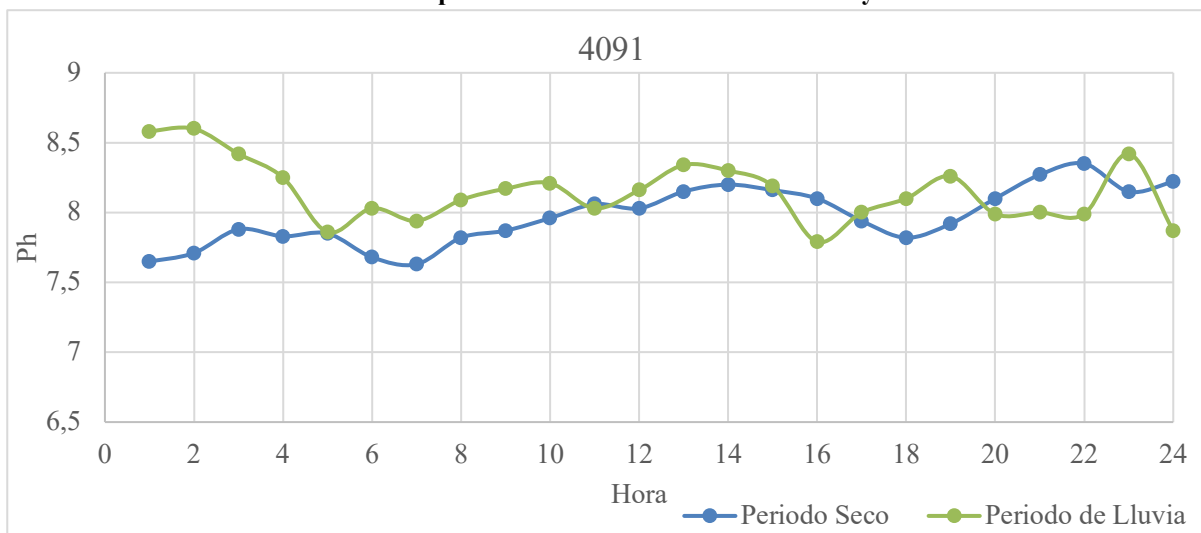


Tabla 14. Resultados Parámetros In-Situ en el Punto 4091.

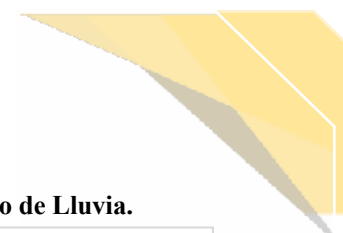
Hora	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia	Periodo Seco	Periodo de Lluvia
	pH		T (°C)		OD (mg/L)	
1	7,65	8,58	19,03	18,30	2,25	2,79
2	7,71	8,60	19,70	19,70	1,62	3,10
3	7,88	8,42	19,40	20,30	0,93	2,47
4	7,83	8,25	19,20	20,50	1,39	3,20
5	7,85	7,86	18,50	20,60	2,73	2,63
6	7,68	8,03	18,80	20,40	1,15	2,58
7	7,63	7,94	18,20	20,30	2,22	2,94
8	7,82	8,09	18,00	19,20	2,40	2,71
9	7,87	8,17	17,70	18,00	2,68	3,72
10	7,96	8,21	18,09	18,70	2,26	3,61
11	8,06	8,03	17,82	18,60	2,26	3,22
12	8,03	8,16	17,81	17,90	1,80	3,77
13	8,15	8,34	18,04	18,50	1,19	3,19
14	8,20	8,30	18,10	18,00	1,11	3,34
15	8,16	8,19	17,80	17,90	0,98	3,02
16	8,10	7,79	17,77	18,70	0,81	2,99
17	7,94	8,00	17,60	17,80	1,02	3,31
18	7,82	8,10	17,43	17,00	1,25	3,30
19	7,92	8,26	17,41	17,40	1,11	2,61
20	8,10	7,99	17,93	15,50	1,16	3,10
21	8,27	8,00	19,05	15,70	1,52	3,00
22	8,35	7,99	19,00	16,90	1,62	2,72
23	8,15	8,42	19,70	17,80	1,67	2,80
24	8,22	7,87	19,50	18,00	1,34	1,18

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

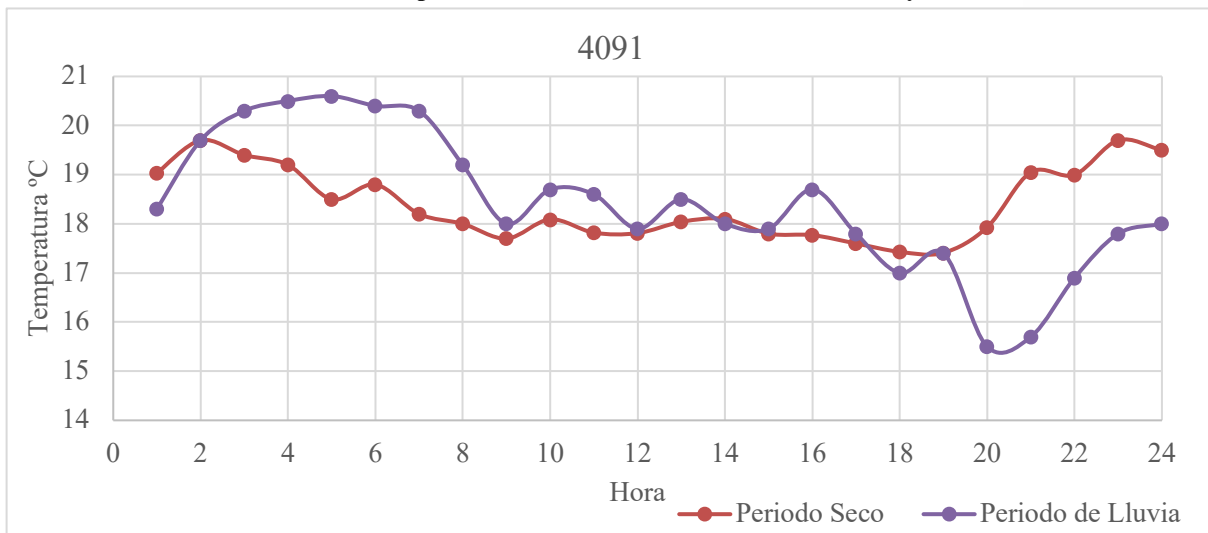
Grafica 7. Resultados pH en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

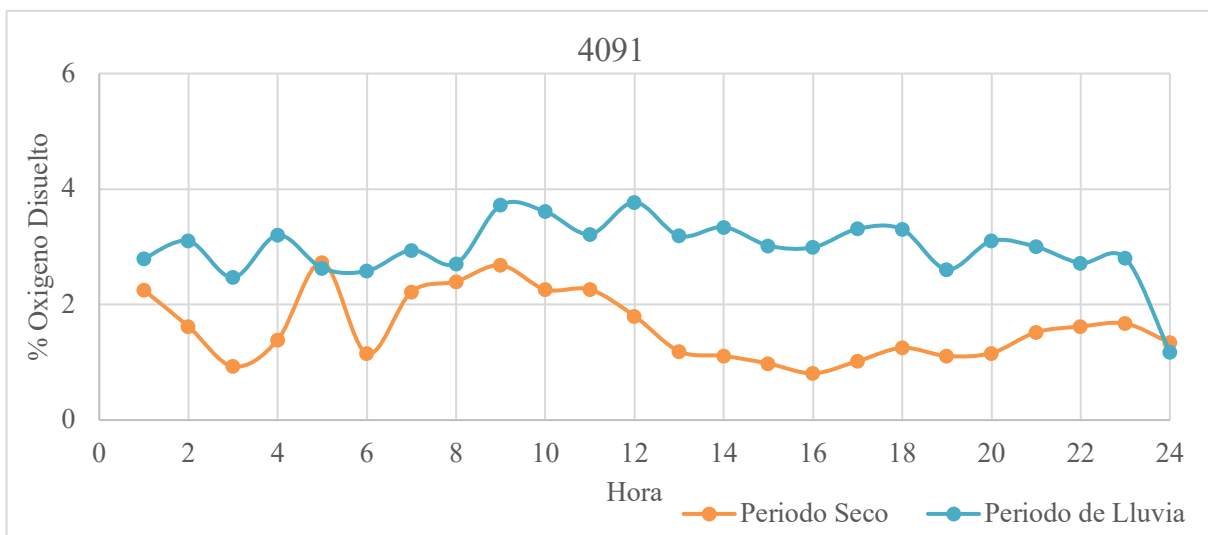


**Grafica 8. Resultados Temperatura en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

**Grafica 9. Resultados Oxígeno Disuelto en el Punto 4091 en Periodo Seco y Periodo de Lluvia.**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., junio de 2019.

Estos valores suministrados por el laboratorio son introducidos en el modelo como se presenta en la Figura 22, estos valores son los relacionados en el punto PATP 4091 en donde observamos que su pH se encuentra dentro del rango en donde puede ser tratada esta agua por medio de procesos biológicos y en donde tanto en periodo seco como en periodo de lluvia no hay una notable variación debido a que la lluvia que se presentó no era de una alta intensidad, como se muestra en la Tabla 15



**Figura 22. Definición de Contaminantes en Modelo SWMM**

Name	Units	Crain	Cgw	Crzii	Kdecay	SnowOnly	Co-Pollutant	Co-Frac	Cdwf	Cinit
DBO5	MG/L	321	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	365.165	0.0
DQO	MG/L	518	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	522.16	0.0
Cloruros	MG/L	41	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	60.69	0.0
SST	MG/L	30	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	117.5	0.0
Sulfatos	MG/L	86.9	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	74.05	0.0
Sulfuros	MG/L	385	0.0	0.0	0.0	NO	*	0.0	4	0.0

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., febrero de 2020.

**Tabla 15. Evento de Lluvia Implementado en el Modelo.**

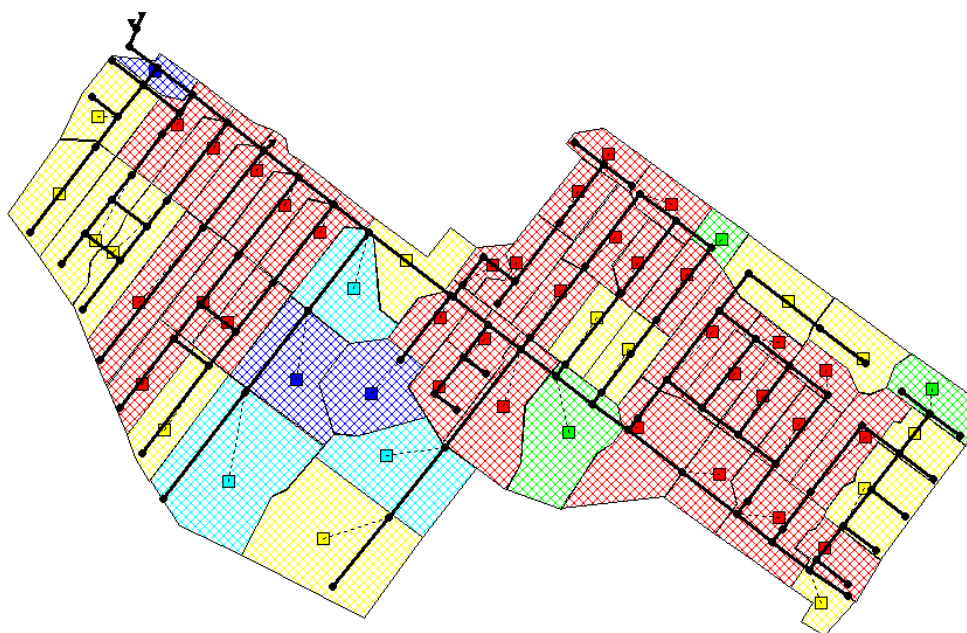
Evento	Lluvia Total (mm)	Volumen de Lluvia (m <sup>3</sup> )	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Periodo de Retorno
16 Julio	3,75	598,50	35	6,43	< 2 años

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., febrero de 2020.

#### 4.1.2. Uso de las Tierra.

Se consideraron tres usos de suelo: residencial, pavimento y cobertura vegetal de acuerdo a lo observado en campo, en donde podemos encontrar que de las 56 cuencas de nuestro estudio un 78% de estas tienen un porcentaje de permeabilidad mayor al 60%.

**Figura 23. % de Impermeabilidad**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2019.



Las áreas permeables se conforman principalmente por los prados cubiertos de hierba, superficies que no se encuentran conectadas con el sistema de alcantarillado y presentan un bajo potencial de esorrentía y facilita la infiltración.

**Tabla 16. Parámetros Determinados para la Subcuenca**

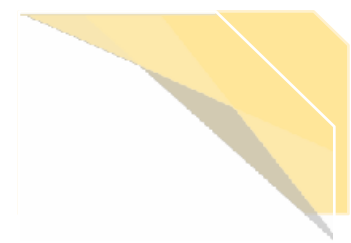
Parámetro	Valor o Rango
Área (Ha)	15,96
Pendiente (%)	0,015 – 2,87
% de Impermeabilidad (%)	71,70
Area Conectada Directamente (%) Zero-Imperm	35,33
Ancho (m)	23,50 – 251,56
Número de Curva CN	35,6 – 90,08

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2019

**Tabla 17. Porcentaje Área - Uso de Suelo**

Sub Cuenca	Uso de Suelo			Sub Cuenca	Uso de Suelo		
	Residencial	Pavimento	Vegetal		Residencial	Pavimento	Vegetal
CM-1	15%	5%	80%	CM-29	70%	30%	0%
CM-2	90%	0%	10%	CM-30	80%	20%	0%
CM-3	50%	5%	45%	CM-31	5%	15%	80%
CM-4	30%	20%	50%	CM-32	0%	10%	90%
CM-5	55%	25%	20%	CM-33	0%	100%	0%
CM-6	75%	10%	15%	CM-34	65%	30%	5%
CM-7	50%	40%	10%	CM-35	80%	20%	0%
CM-8	5%	80%	15%	CM-36	2%	10%	88%
CM-9	85%	10%	5%	CM-37	90%	10%	0%
CM-10	70%	20%	10%	CM-38	0%	5%	95%
CM-11	20%	50%	30%	CM-39	0%	5%	95%
CM-12	95%	5%	0%	CM-40	0%	15%	85%
CM-13	75%	15%	10%	CM-41	20%	65%	15%
CM-14	90%	10%	0%	CM-42	70%	20%	10%
CM-15	60%	10%	30%	CM-43	60%	30%	10%
CM-16	40%	50%	10%	CM-44	75%	20%	5%
CM-17	20%	60%	20%	CM-45	60%	40%	0%
CM-18	0%	40%	60%	CM-46	70%	30%	0%
CM-19	50%	30%	20%	CM-47	70%	30%	0%
CM-20	60%	20%	20%	CM-48	65%	30%	5%
CM-21	10%	70%	20%	CM-49	70%	30%	0%
CM-22	80%	10%	10%	CM-50	50%	30%	20%
CM-23	85%	10%	5%	CM-51	70%	30%	0%
CM-24	10%	90%	0%	CM-52	40%	30%	30%
CM-25	70%	10%	20%	CM-53	55%	30%	15%
CM-26	70%	20%	10%	CM-54	50%	20%	30%
CM-27	90%	10%	0%	CM-55	50%	20%	30%
CM-28	90%	10%	0%	CM-56	60%	40%	0%

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., abril de 2019.



#### 4.1.3. Simulación:

Finalmente procedemos a realizar la simulación del modelo en SWMM ingresando los datos que presentamos en los capítulos anteriores en cuanto a valores de contaminantes y de uso del suelo.

La tasa de evaporación depende de factores meteorológicos y de las características de la superficie y es influenciada por el contenido de humedad en la masa de aire cercana a la superficie de evaporación (Fattorelli & Fernandez, 2011), se tomaron los registros de evaporación de la estación climatológica UPTC ya que es la mas cercana a la zona de estudio como se presenta en la tabla Tabla 18 y dando como resultado la continuidad de la escorrentía simulada en el modelo presentado en la Figura 24. (Amaya & Cortes, 2020)

**Tabla 18. Evaporación Media Total Mensual Multianual de la Estación Climatológica UPTC**

Evaporación	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Media/Mensual (mm)	86,8	92,8	100	102
Media/Diaria (mm/d)	2,89	3,09	3,33	3,40
Promedio (mm/d)	3,18			

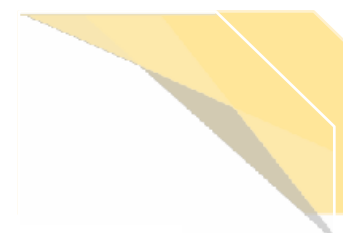
Fuente: IDEAM, 20181121105816.

**Figura 24. Escorrentía**

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Total Precipitation .....	0.060	3.750
Evaporation Loss .....	0.006	0.345
Infiltration Loss .....	0.017	1.082
Surface Runoff .....	0.036	2.272
Final Storage .....	0.001	0.052
Continuity Error (%) .....	-0.035	

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., marzo de 2020.

La Figura 25, muestra la calidad de la escorrentía en el balance de continuidad en todo el estudio de la zona. Las cargas de entrada se incluyen en “Initial Buildup” antes del inicio de la simulación, “Surface Buildup” durante el periodo seco, y “Wet Deposition” contaminantes en la lluvia. Las cargas de salida incluyen “Infiltration Loss” generada por cualquier lluvia directa, “Surface Runoff” la carga contaminante donde incluye una porción de acumulación y el informe de continuidad indica “Remaining Buildup”.



**Figura 25. Calidad de la Escorrentía en la Zona de Estudio**

***** Runoff Quality Continuity *****	DBO-5 kg	DQO kg	Cloruros kg	SST kg	Sulfatos kg	Sulfuros kg
Initial Buildup .....	616.651	1317.268	1317.268	1317.268	1317.268	1317.268
Surface Buildup .....	65.298	125.227	125.227	125.227	125.227	125.227
Wet Deposition .....	192.177	310.118	24.546	17.960	52.026	230.493
Sweeping Removal .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Infiltration Loss .....	55.474	89.519	7.085	5.184	15.018	66.534
BMP Removal .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Surface Runoff .....	343.941	996.647	823.662	819.673	840.308	948.415
Remaining Buildup .....	457.080	637.994	634.041	633.950	634.421	636.892
Continuity Error (%) .....	2.017	1.623	0.154	0.113	0.319	1.264

**Fuente:** LARA PÉREZ, M.Y., marzo de 2020.

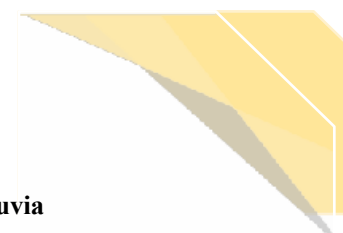
La Figura 26 muestra el enrutamiento de la calidad, solo las cargas de escorrentía se muestran a través del sistema de transporte. Sin clima seco, únicamente suministrado por el usuario mediante entradas externas. Por lo tanto, las tres variables representadas son “*Wet Weather Inflow*”, “*External Outflow*” y “*Final Stored Mass*”. La entrada del clima húmedo es la misma.

**Figura 26. Enrutamiento de Calidad**

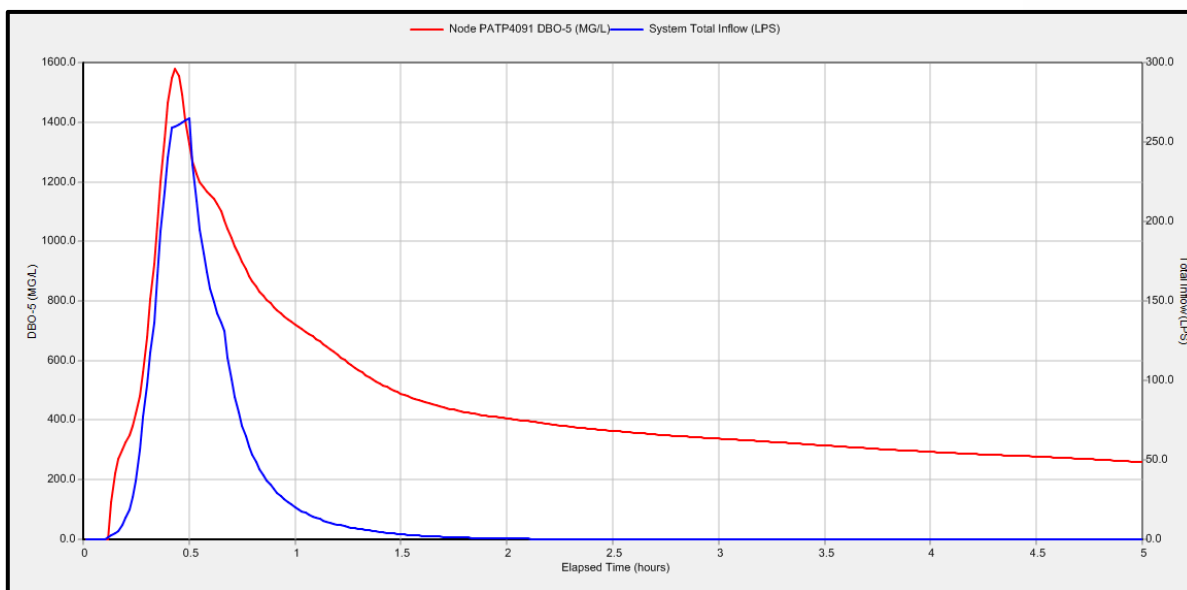
***** Quality Routing Continuity *****	DBO-5 kg	DQO kg	Cloruros kg	SST kg	Sulfatos kg	Sulfuros kg
Dry Weather Inflow .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Wet Weather Inflow .....	343.758	996.353	823.639	819.656	840.259	948.196
Groundwater Inflow .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RDII Inflow .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
External Inflow .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
External Outflow .....	335.908	940.902	768.148	764.164	784.771	892.734
Flooding Loss .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Exfiltration Loss .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mass Reacted .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Initial Stored Mass .....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Final Stored Mass .....	0.304	0.597	0.264	0.256	0.296	0.504
Continuity Error (%) .....	2.195	5.505	6.705	6.739	6.568	5.796

**Fuente:** LARA PÉREZ, M.Y., marzo de 2020.

A continuación, se muestra el comportamiento de los contaminantes evaluados en el nodo cercano a la salida (PATP 4091) cuando se presenta un evento de lluvia, en donde se evidencia que al inicio del evento de lluvia hay una elevación en la concentración de la carga contaminante y cuando este evento finaliza la carga empieza a disminuir a tal punto que es menor que en periodo seco ya que esta primera lluvia lo que realiza es un arrastre de la mayoría de los contaminantes presentes en la cuenca, traduciéndose en que la carga vaya disminuyendo a medida que pasa la creciente.

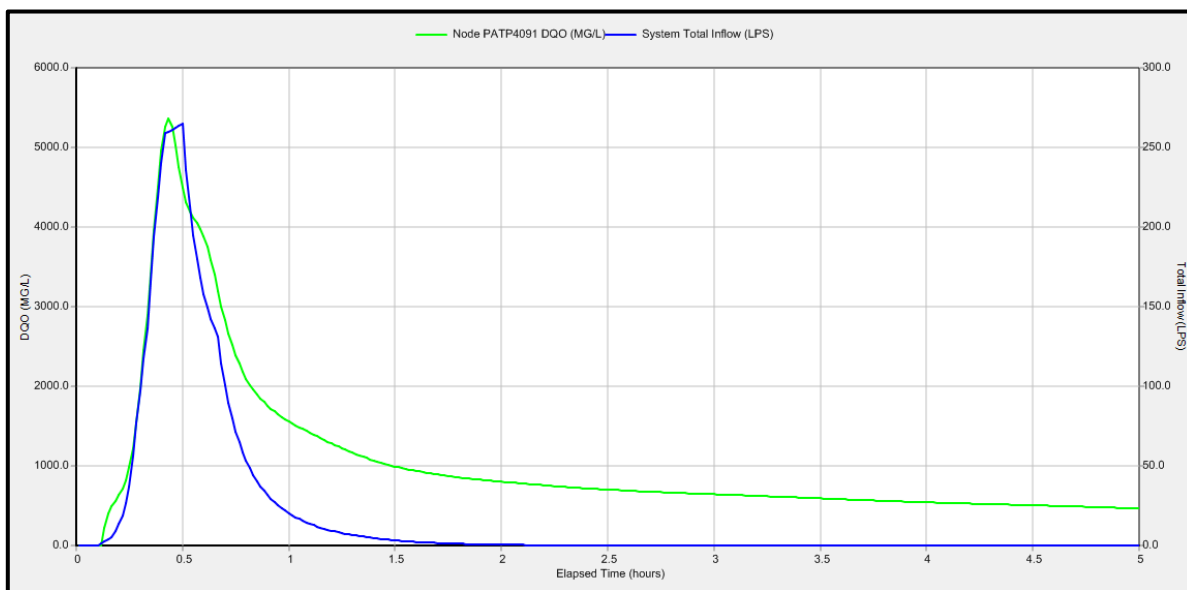


**Figura 27. Comportamiento DBO5 y Caudal Total en un Evento de Lluvia**

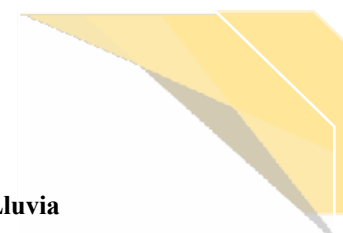


Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

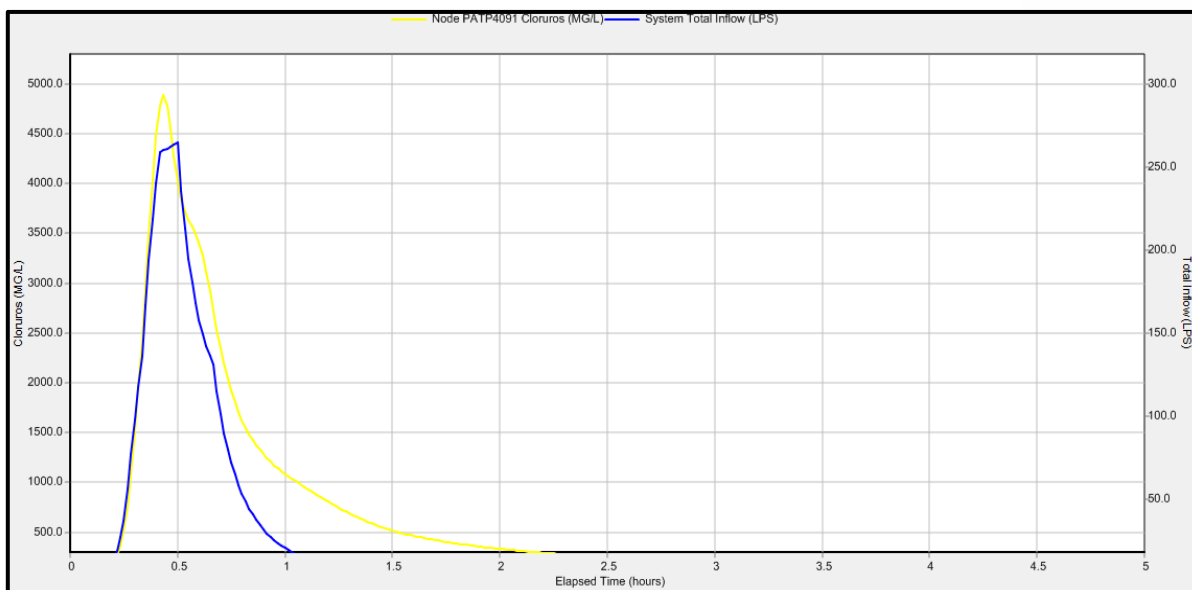
**Figura 28. Comportamiento DQO y Caudal Total en un Evento de Lluvia**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

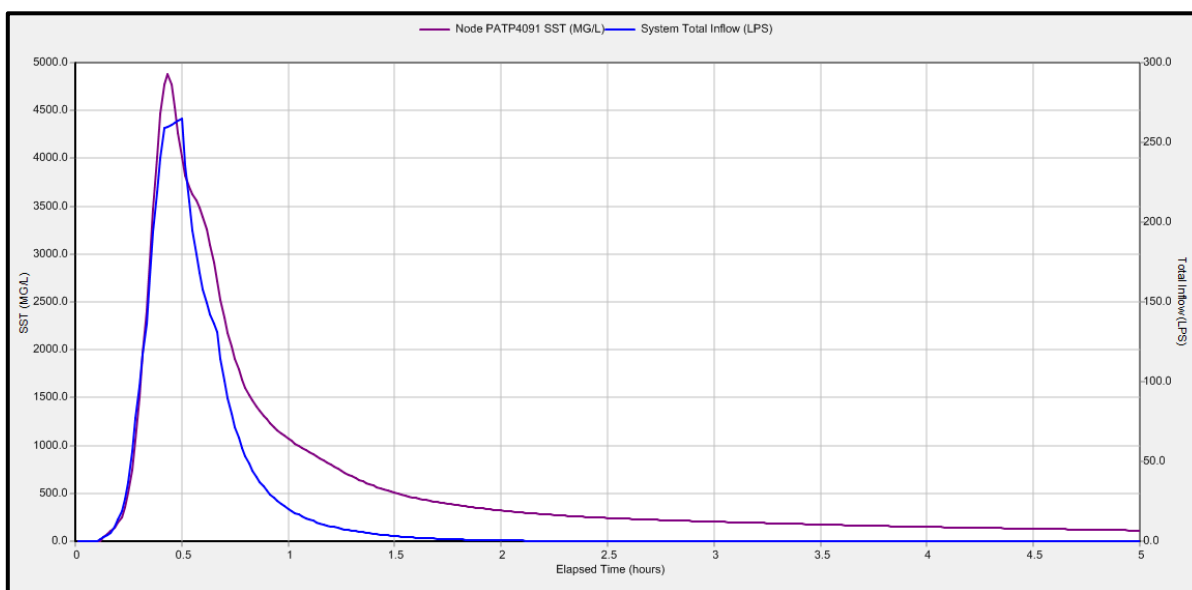


**Figura 29. Comportamiento Cloruros y Caudal Total en un Evento de Lluvia**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

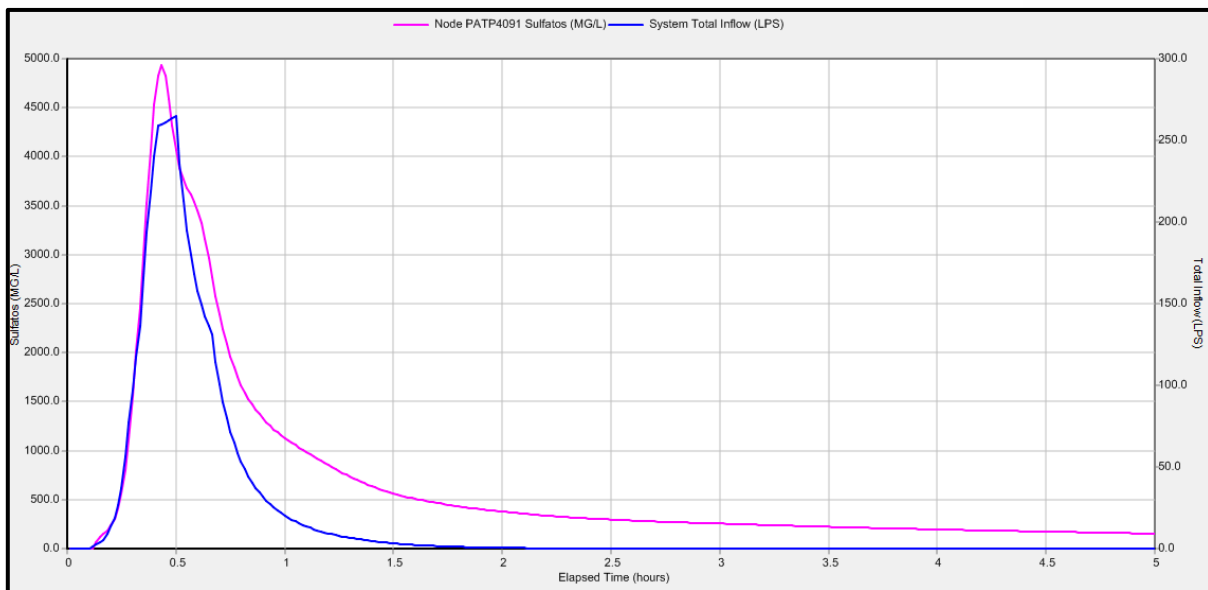
**Figura 30. Comportamiento SST y Caudal Total en un Evento de Lluvia**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

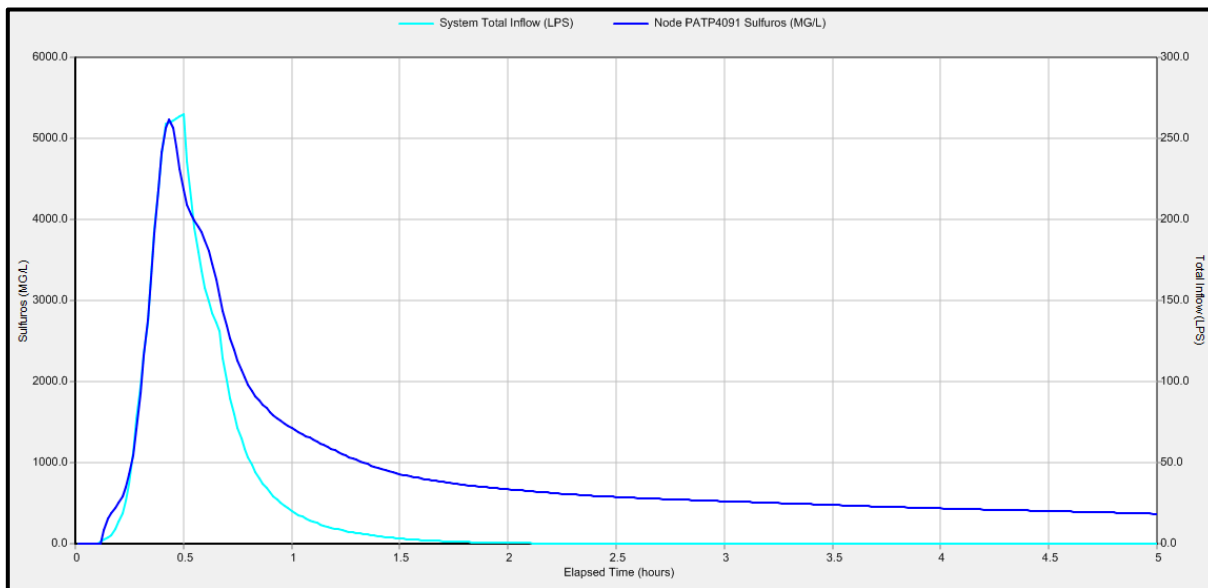


**Figura 31. Comportamiento Sulfatos y Caudal Total en un Evento de Lluvia**



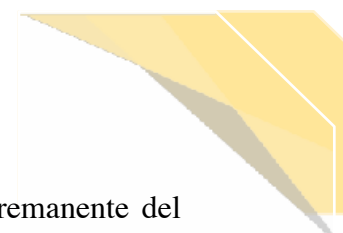
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

**Figura 32. Comportamiento Sulfuros y Caudal Total en un Evento de Lluvia**



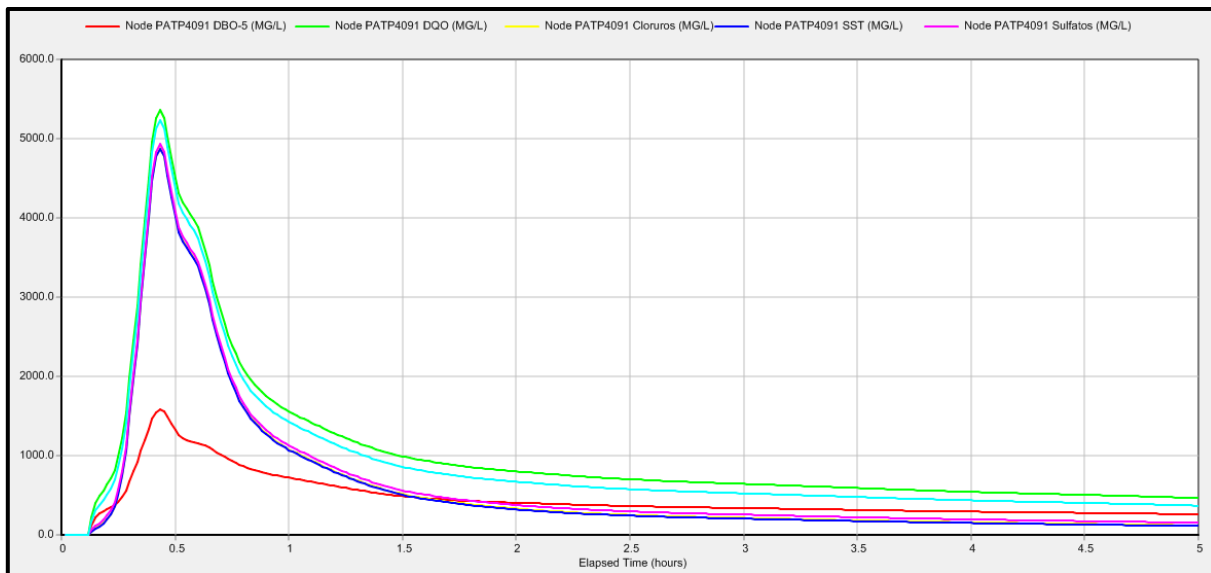
Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

Las Figura 27, Figura 28, Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30 compara los resultados medidos del caudal y de los diferentes contaminantes establecidos en el modelo y el modelado en la salida de la cuenca combinada. Para todos los casos, las concentraciones de contaminantes excedieron el caudal máximo, mostrando la relevancia



de los procesos de acumulación, lavado y transporte ya que se genera un remanente del contaminante generando así que el caudal disminuya primero que la carga contaminante.

**Figura 33. Comparación de los Contaminantes Evaluados en un Evento de Lluvia**



Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., mayo de 2020.

La Figura 33 muestra el comportamiento de todos los contaminantes estudiados en un periodo de lluvia en donde se evidencia que el DBO<sub>5</sub> tiene menor concentración que los demás y siendo el DQO el de mayor concentración.

#### 4.2. Generación de Sulfuro

A continuación, se presentan los cálculos necesarios para establecer la probabilidad de producción de sulfuro de hidrogeno en el primer tramo (PATLAL 4741):

**Edbo5:** En el modelo encontramos un reporte de los contaminantes asociados al modelo en cada uno de los tramos del sistema y para obtener el valor de eficiencia de la demanda bioquímica de oxigeno debemos dividir este valor al volumen de flujo que hay en el nodo de salida de este tramo como se indica en la Figura 34 y Figura 35.



Figura 34. Resumen de los Contaminantes en el Tramo PATLAL4741 para eDBOs

Link	DBO-5 kg	DQO kg	Cloruros kg	SST kg	Sulfatos kg	Sulfuros kg
PATLAL4741	0.041	0.125	0.109	0.109	0.110	0.120

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

Figura 35. Resumen del Flujo en el Nodo PATP4014 para eDBOs

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS	Day of Maximum Inflow	Hour of Maximum Inflow	Lateral Inflow Volume 10 <sup>6</sup> ltr	Total Inflow Volume 10 <sup>6</sup> ltr	Flow Balance Error Percent
PATP4014	JUNCTION	4.92	10.33	0	00:30	0.00682	0.015	0.586

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

$$eDBO_5 = \frac{0,041}{0,015} = 2,73 \text{mg/l}$$

Ecuación 5. DBO5 eficiente.

S: Para obtener la pendiente hacemos la relación de la diferencia de cotas en el nodo de entrada Figura 36 y el nodo de salida Figura 37 sobre la longitud del tramo Figura 38.

Figura 36. Datos Nodo de Entrada PATP 4013 del Tramo PATLP 4741 para S

Property	Value
Name	PATP4013
X-Coordinate	1080607.890
Y-Coordinate	1105349.844
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	2685.94

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.



Figura 37. Datos Nodo de Salida PATP 4014 del Tramo PATLP 4741 para S

Property	Value
Name	PATP4014
X-Coordinate	1080621.230
Y-Coordinate	1105366.835
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	2685.88

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

Figura 38. Resumen de Características en el Nodo PATP4014 para S

Property	Value
Name	PATLAL4741
Inlet Node	PATP4013
Outlet Node	PATP4014
Description	
Tag	
Shape	CIRCULAR
Max. Depth	0.35
Length	21.6
Roughness	0.016

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

$$S = \frac{2685,94 - 2685,88}{21,6} = 0,0028$$

Ecuación 6. Pendiente

Q: El cálculo se lleva a cabo con el caudal mayor en el tramo de estudio, Figura 39.

Figura 39. Resumen del Flujo en el Tramo PATLAL4741 para Q

Link	Type	Maximum [Flow] LPS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
PATLAL4741	CONDUIT	0.21	0	00:26	0.04	0.00	0.13

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.



$$Q = \frac{0,21 \text{ l/s}}{28,317 \text{ l/ft}^3} = 0,0074 \text{ ft}^3/\text{s}$$

Ecuación 7. Caudal

**P:** El perímetro mojado lo obtenemos de acuerdo a la relación geométrica entre el tirante y el diámetro Y/D Figura 40 y P/D Figura 41 el diámetro lo tenemos en la Figura 42.

Figura 40. Resumen del Flujo en el Tramo PATLAL4741 para P y b

Link	Type	Maximum [Flow] LPS	Day of Maximum Flow	Hour of Maximum Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
PATLAL4741	CONDUIT	0.21	0	00:26	0.04	0.00	0.13

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

Figura 41. Relación Geométrica de los Conductos para el Tramo PATLAL 4741 para P y b

Y/D	A/D <sup>2</sup>	P/D	R/D	Y/D	A/D <sup>2</sup>	P/D	R/D
0,01	0,0013	0,2093	0,0066	0,26	0,1623	1,0701	0,1516
0,02	0,0037	0,2838	0,0132	0,27	0,1711	1,0928	0,1566
0,03	0,0069	0,3482	0,0197	0,28	0,1800	1,1152	0,1614
0,04	0,0105	0,4027	0,0262	0,29	0,1890	1,1373	0,1662
0,05	0,0147	0,4510	0,0326	0,30	0,1982	1,1593	0,1709
0,06	0,0192	0,4949	0,0389	0,31	0,2074	1,1810	0,1755
0,07	0,0242	0,5355	0,0451	0,32	0,2167	1,2025	0,1801
0,08	0,0294	0,5735	0,0513	0,33	0,2260	1,2239	0,1848
0,09	0,0350	0,6094	0,0574	0,34	0,2355	1,2451	0,1891
0,10	0,0409	0,6435	0,0635	0,35	0,2450	1,2661	0,1935
0,11	0,470	0,6761	0,0695	0,36	0,2546	1,2870	0,1978
0,12	0,0544	0,7075	0,0754	0,37	0,2642	1,3078	0,2020
0,13	0,0600	0,7377	0,0813	0,38	0,2739	1,3284	0,2061
0,14	0,0668	0,7670	0,0871	0,39	0,2836	1,3490	0,2102
0,15	0,0739	0,7954	0,0929	0,40	0,2934	1,3694	0,2142
0,16	0,0811	0,8230	0,0986	0,41	0,3032	1,3898	0,2181
0,17	0,0885	0,8500	0,1042	0,42	0,3130	1,4101	0,2220
0,18	0,0961	0,8763	0,1097	0,43	0,3228	1,4303	0,2257
0,19	0,1039	0,9020	0,1152	0,44	0,3328	1,4505	0,2294
0,20	0,1118	0,9273	0,1206	0,45	0,3428	1,4706	0,2331
0,21	0,1199	0,9521	0,1259	0,46	0,3527	1,4907	0,2366
0,22	0,1281	0,9764	0,1312	0,47	0,3627	1,5108	0,2400
0,23	0,1365	1,0003	0,1364	0,48	0,3727	1,5308	0,2434
0,24	0,1449	1,0239	0,1416	0,49	0,3827	1,5508	0,2467
0,25	0,1535	1,0472	0,1466	0,50	0,3927	1,5708	0,2500

Fuente: Máximo Villon, B. Hidráulica de Canales., julio de 2020.

$$\frac{P}{D} = 0,7377$$

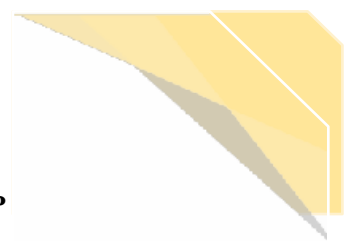


Figura 42. Resumen de Características en el Nodo PATP4014 para P

Property	Value
Name	PATLAL4741
Inlet Node	PATP4013
Outlet Node	PATP4014
Description	
Tag	
Shape	CIRCULAR
Max. Depth	0.35
Length	21.6
Roughness	0.016

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

$$P=0,7377*(0,35 \text{ m}*3,281 \text{ ft/m})= 0,85$$

**Ecuación 8. Perímetro Mojado**

**B:** El ancho de la superficie lo podemos obtener con la formula presentada a continuación:

$$b=D* \sin \frac{\theta}{2}$$

**Ecuación 9. Ancho de la Superficie**

En donde  $\theta$  se obtiene de un proceso iterativo al despejarlo de la siguiente ecuación:

$$A=\frac{1}{8}(\theta- \sin \theta)D^2$$

**Ecuación 10. Area Efectiva**

El área se obtiene con la relación geométrica entre el tirante y el diámetro Y/D Figura 40 y A/D<sup>2</sup> Figura 41 el diámetro lo tenemos en la Figura 42

$$\frac{A}{D^2}=0,0600 \quad \theta=1,47546$$

$$b=(0,35 \text{ m}*3,281 \text{ ft/m})* \sin \frac{1,475446}{2}=0,772 \text{ ft}$$



Con lo anterior tenemos los datos necesarios para plantear la ecuación de Pomeroy:

$$Z = \frac{2,73}{00028^{0,50} * 0,0074^{0,33}} * \frac{0,85}{0,772} = 286,948$$

**Ecuación 11. Ecuación Pomeroy**

La Tabla 19 muestra los resultados de todos los tramos de la zona de estudio en donde el color verde indica que el sulfuro raramente se produce, el amarillo indica una probabilidad de que este se produzca y el rojo evidencia la acumulación de sulfuro de hidrogeno. Estableciendo así que de las 112 tuberías en concreto presentes en la red de la zona de estudio 52 de estas tienen una alta probabilidad de generación de sulfuro y 3 de estas tienen una condición secundaria de generación de sulfuro como lo indica la interpretación del valor de Z.

**Tabla 19. Probabilidad de Producción de Sulfuro de Hidrogeno**

Tramo	eDBO5 (mg/l)	S	Caudal (ft3/s)	P (ft)	b (ft)	Z
PATLAL4741	2,73	0,0028	0,0074	0,85	0,772	286,948
PATLAL4742	785,70	0,0072	0,3517	1,15	1,008	14961,449
PATLAL4743	699,03	0,0047	0,3510	1,74	1,274	19732,557
PATLAL4744	61,98	0,0054	0,3687	2,19	1,306	1959,816
PATLAL4745	452,33	0,0013	0,1928	1,22	1,050	25010,071
PATLAL4746	377,38	0,0026	0,0773	1,08	0,962	19325,388
PATLAL4747	0,00	0,0070	0,0000	0,33	0,320	0,000
PATLAL4748	0,00	0,0060	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4749	484,43	0,0004	0,1056	1,18	1,030	55131,607
PATLAL4750	641,96	0,0029	0,2525	0,15	1,179	2428,179
PATLAL4751	80,70	0,0136	0,3524	1,74	1,274	1334,034
PATLAL4752	717,51	0,0018	3,0452	3,21	2,394	15509,457
PATLAL4754	853,94	0,0012	2,7259	3,16	2,379	23519,386
PATLAL4757	0,00	0,0050	0,0000	0,37	0,366	0,000
PATLAL4758	0,00	0,0083	0,0064	1,04	0,937	0,000
PATLAL4759	32,86	0,0029	0,0675	1,55	1,214	1898,148
PATLAL4760	48,38	0,0046	0,2892	2,27	1,296	1878,098
PATLAL4761	921,83	0,0017	3,9376	3,41	2,443	20049,830
PATLAL4762	887,79	0,0006	4,0877	3,31	2,421	30969,852
PATLAL4763	913,54	0,0000	4,3991	3,16	2,379	0,000
PATLAL4764	5,54	0,0035	0,0650	1,77	1,280	320,329
PATLAL4765	874,58	0,0032	4,5093	3,36	2,432	13064,168
PATLAL4766	48,20	0,0021	0,2140	2,86	2,176	2319,844
PATLAL4768	590,94	0,0042	0,1900	1,41	1,203	18467,157
PATLAL4769	0,00	0,0039	0,0000	0,65	0,623	0,000
PATLAL4771	862,19	0,0009	4,6746	3,67	2,481	25334,140
PATLAL4772	60,10	0,0028	0,3945	2,33	1,286	2816,970



Tramo	eDBO5 (mg/l)	S	Caudal (ft3/s)	P (ft)	b (ft)	Z
PATLAL4773	463,27	0,0020	0,2214	1,25	1,069	19934,308
PATLAL4774	0,00	0,0009	0,0000	0,61	0,573	0,000
PATLAL4775	974,49	0,0066	0,2472	1,15	0,967	22679,642
PATLAL4776	0,00	0,0053	0,0000	0,66	0,623	0,000
PATLAL4777	0,00	0,0205	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4778	0,00	0,0025	0,0000	0,00	0,030	0,000
PATLAL4779	828,45	0,0031	0,2338	1,15	0,967	28491,066
PATLAL4780	402,73	0,0029	0,2137	1,15	1,008	14134,925
PATLAL4781	40,38	0,0034	0,3803	2,01	1,311	1452,415
PATLAL4782	873,11	0,0018	4,9479	3,67	2,481	17733,161
PATLAL4783	863,97	0,0006	5,2470	3,62	2,476	29716,490
PATLAL4784	0,00	0,0037	0,0000	0,78	1,134	0,000
PATLAL4785	36,42	0,0037	0,3489	1,90	1,303	1236,264
PATLAL4787	870,89	0,0027	5,5373	3,62	2,476	13859,458
PATLAL4788	879,92	0,0015	5,7527	3,62	2,476	18495,793
PATLAL4789	875,06	0,0018	5,7255	3,52	2,461	16470,123
PATLAL4790	27,54	0,0073	0,2080	2,15	1,142	1018,695
PATLAL4791	307,30	0,0012	0,2211	1,18	0,926	18608,470
PATLAL4792	1030,76	0,0020	0,2483	1,87	1,146	59200,972
PATLAL4794	1267,01	0,0040	0,2444	1,33	1,053	40473,978
PATLAL4795	0,00	0,0035	0,0000	0,70	0,657	0,000
PATLAL4796	31,83	0,0053	0,2352	1,69	1,143	1037,811
PATLAL4797	0,00	0,0029	0,0000	0,74	0,689	0,000
PATLAL4798	0,00	0,0037	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4799	0,00	0,0025	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4800	0,00	0,0057	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4801	0,00	0,0047	0,0000	0,00	0,031	0,000
PATLAL4802	0,00	0,0035	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4803	0,00	0,0018	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL4804	0,00	0,0019	0,0000	0,70	0,657	0,000
PATLAL4805	641,97	0,0044	0,2066	1,12	0,951	19181,969
PATLAL4806	836,67	0,0027	0,3704	1,55	1,120	31057,307
PATLAL4807	0,00	0,0053	0,0000	0,40	0,392	0,000
PATLAL4809	22,86	0,0040	0,0346	1,16	0,917	1379,208
PATLAL4810	57,18	0,0086	0,3931	2,04	1,125	1518,157
PATLAL4811	925,85	0,0042	6,1080	3,26	2,408	10606,031
PATLAL4994	70,92	0,0108	0,2617	2,01	1,311	1627,460
PATLAL4995	501,12	0,0020	0,1208	1,31	1,105	27077,951
PATLAL4996	105,79	0,0100	0,2850	1,98	1,310	2424,133
PATLAL4997	654,80	0,0014	0,1649	1,49	1,191	39640,400
PATLAL4998	1025,13	0,0035	0,1896	1,12	0,986	33712,539
PATLAL4999	0,00	0,0046	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL5000	0,00	0,0034	0,0000	0,00	0,035	0,000
PATLAL5001	0,00	0,0032	0,0000	0,75	0,712	0,000
PATLAL7594	40,84	0,0007	0,0046	0,66	0,623	9346,264
PATLAL7595	0,00	0,0022	0,0000	0,46	0,450	0,000
PATLAL7596	540,94	0,0062	0,0791	0,81	0,746	17278,768
PATLAL7597	0,00	0,0047	0,0000	0,61	0,586	0,000
PATLAL7598	1077,87	0,0062	0,1190	0,85	0,772	30387,260



Tramo	eDBO5 (mg/l)	S	Caudal (ft3/s)	P (ft)	b (ft)	Z
PATLAL7599	364,71	0,0010	0,1151	1,18	1,030	27500,090
PATLAL7600	1070,14	0,0038	0,3535	1,34	1,121	29416,646
PATLAL7601	434,09	0,0101	0,3496	1,28	1,087	7212,652
PATLAL7603	0,00	0,0070	0,0000	1,12	1,087	0,000
PATLAL7604	0,00	0,0054	0,0000	0,81	0,746	0,000
PATLAL7605	0,00	0,0081	0,0000	0,70	0,657	0,000
PATLAL7606	0,00	0,0044	0,0000	0,57	0,545	0,000
PATLAL7607	1038,02	0,0018	0,0646	0,85	0,772	66811,409
PATLAL7608	245,85	0,0024	0,0600	0,91	0,820	14086,141
PATLAL7609	709,01	0,0051	0,2211	1,01	0,882	18706,940
PATLAL7610	1001,47	0,0145	0,3563	1,18	1,030	13436,455
PATLAL7612	680,12	0,0024	0,4248	1,84	1,677	20397,905
PATLAL7613	671,07	0,0039	0,7674	2,12	1,873	13211,050
PATLAL7615	908,96	0,0014	1,3003	2,37	2,031	26256,416
PATLAL7616	572,65	0,0016	1,4592	2,61	2,159	15333,006
PATLAL7619	872,21	0,0028	2,5246	2,89	2,285	15472,388
PATLAL7620	0,00	0,0038	0,0000	0,52	0,501	0,000
PATLAL7621	311,75	0,0014	0,0650	0,95	0,842	23382,543
PATLAL7622	854,89	0,0026	0,2260	1,18	1,030	31519,325
PATLAL7623	353,90	0,0019	0,2468	1,34	1,121	15548,603
PATLAL7624	851,85	0,0040	0,7999	1,55	1,214	18593,306
PATLAL7625	263,12	0,0081	0,8013	1,82	1,291	4449,585
PATLAL7626	71,53	0,0042	0,0321	0,81	0,746	3718,041
PATLAL7627	84,73	0,0033	0,0300	0,89	0,821	5086,538
PATLAL7628	384,87	0,0016	0,1010	1,08	0,962	23324,631
PATLAL7629	0,00	0,0073	0,0000	0,23	0,227	0,000
PATLAL7630	0,00	0,0067	0,0000	0,65	0,623	0,000
PATLAL7631	0,00	0,0087	0,0000	0,40	0,392	0,000
PATLAL7632	5,24	0,0020	0,0028	0,78	0,719	877,806
PATLAL7633	318,60	0,0018	0,1596	1,23	1,007	16701,222
PATLAL7634	277,06	0,0015	0,3348	1,43	1,088	13416,357
PATLAL7635	922,40	0,0006	0,2458	1,22	1,050	70174,637
PATLAL7636	158,64	0,0140	0,2437	1,15	1,008	2435,488
PATLAL9265	229,37	0,0039	0,0406	0,75	0,712	11200,975
PATP4812	0,00	0,0080	0,0000	0,00	0,076	0,000
VERT	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,157	0,000

Fuente: LARA PÉREZ, M.Y., julio de 2020.

El sulfuro de hidrogeno se forma a partir de una reacción biológica en sistemas de desagüe, generada a través de una fermentación anaeróbica de materia orgánica presente en aguas residuales. Cuando en el interior de una tubería no hay oxígeno, los microorganismos se alimentan y producen sulfuro de hidrogeno con un característico olor a huevo podrido que puede ser altamente toxico para los seres humanos. Este es un gas incoloro y nocivo que se genera en las redes de alcantarillado en las que no hay oxígeno teniendo efectos adversos para la salud ya que produce una gran irritación de los ojos y de las membranas mucosas



del tracto respiratorio (Bas, 2017).

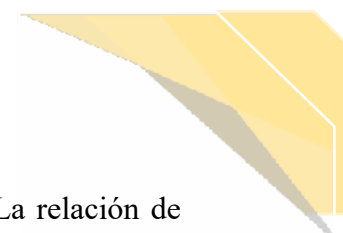
Las aguas residuales en las tuberías de drenaje contienen altas concentraciones de sales de sulfato ocasionando un proceso de corrosión en las tuberías de hormigón conocido como corrosión influenciada microbiológicamente que se lleva a cabo en cuatro etapas iniciando con la formación del sulfuro de hidrogeno bajo condiciones anaerobias se oxida generando acido sulfúrico biogenico generando problemas graves de corrosión en sistemas que tienen una concentración igual o superior a 2,0 mg/L en donde uno de los métodos para controlar la producción de azufre es optimizar el diseño hidráulico del sistema utilizando modelos de predicción para la formación de sulfuro de hidrogeno y para la acumulación de azufre (Cortes & Vera, 2019).

Este fenómeno tiene un gran impacto económico, ya que en países como Alemania el 40% se gastan mil millones de dólares reparando los daños causados por el acido sulfúrico biogenico; en Flandes, Bélgica la corrosión representa un costo del 10% del costo total del tratamiento de las aguas residuales y en Estados Unidos se gastan 400 millones de euros en la restauración de los oleoductos afectados por el acido sulfúrico biogenico. (Cortes & Vera, 2019)

#### 4.2.1. Influencia del Oxígeno en la Generación de Sulfuros

En un sistema de alcantarillado que circula por gravedad tiene lugar la aireación del agua que puede ser lenta en los grandes colectores debido a la suave pendiente y a la profundidad de flujo, en tuberías más pequeñas la tasa aumenta, y en los sistemas a presión esto no ocurre por lo que el oxígeno presente se consume en un menor tiempo y produce mayor generación de sulfuros.

El oxígeno se consume por los microorganismos presentes en la masa de agua como en el biofilm de las tuberías y la tasa de consumo y oxígeno puede variar dependiendo de la distancia que tiene que recorrer el agua residual debido a la difusión en la película biológicamente activa de la pared de las tuberías. La estructura del biofilm se encuentra formado por varias capas, encontrando una zona aerobia y otra anaerobia, si prevalece la



primera se darán las condiciones para que ocurra la reducción de sulfatos. La relación de estas zonas se delimita por la concentración de materia orgánica. Si la concentración de oxígeno en la corriente es cercana a cero, entonces no se podrá oxidar todo el sulfuro y este se pasará a la corriente (Roca, 2012).

### 3.5.8 Inyección de Aire en Tuberías de Impulsión.

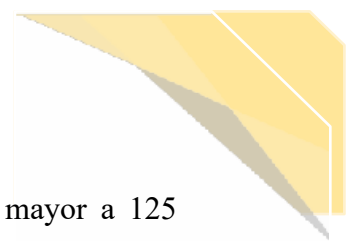
La inyección de aire en el agua residual mejora el balance de oxígeno en los sistemas de conducción, ya que consigue el oxígeno necesario en el agua para prevenir o reducir significativamente la generación de sulfuros y permitir que se produzca la oxidación bioquímica de los sulfuros disueltos existentes. Existen diferentes métodos para la inyección de aire entre los que se encuentran la inyección directa y compresión de aire en la tubería a presión, esta ha sido aplicada ampliamente. Incrementando la presión en las tuberías de impulsión se consiguen grandes cantidades de oxígeno disuelto en el flujo. A presión atmosférica el agua tendrá disuelto aproximadamente el 2% en aire de su volumen (Roca, 2012).

### 3.5.9. Aireación en Tuberías de Gravedad.

El oxígeno que se consigue mediante la aireación de la superficie del agua residual a lo largo del sistema de conducción se va perdiendo debido al consumo que llevan a cabo los microorganismos presentes en el agua y en el biofilm durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Pomeroy y Parkhurst obtuvieron como resultado de la investigación que cuanto menor era el diámetro de la tubería mayor era la tasa de aireación debido a una profundidad menor del flujo de agua y además a mayor velocidad habría una turbulencia mayor en donde la aireación aumentaba (Roca, 2012).

## 4.3. Normativa Vigente – Resolución 0631 – 2015.

Realizando una revisión de los valores máximo permisibles en vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, el artículo 6 del capítulo III establece que se realizara el análisis de y reporte de los valores de la concentración en Número más Probable (NMP/100mL) de los coliformes presentes en los vertimientos de aguas



residuales, cuando la carga másica en las aguas antes del tratamiento sea mayor a 125 kg/día de DBO<sub>5</sub>. Por lo tanto, nuestro muestreo indica que es necesario realizar un análisis de estos coliformes si se lleva a cabo un vertimiento puntual de esta agua residual. Los parámetros fisicoquímicos analizados y sus valores máximos permitidos teniendo en cuenta esta normativa son presentados a continuación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015):

**Tabla 20. Valores Máximos Permisibles en los Vertimientos de Aguas Residuales**

Parámetro	Unidades	Valor Máximo Permitido
pH		6.00 a 9.00
DQO	mg/L	180,00
SST	mg/L	90,00

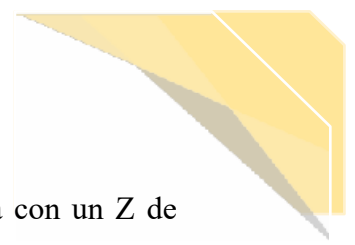
**Fuente:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 0631/2015.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en nuestras muestras se establece que es necesario realizar el tratamiento del agua residual ya que en periodo seco los valores superan el máximo permisible en los vertimientos puntuales de aguas residuales y los demás valores analizados como sulfatos, nitritos y nitratos se les debe realizar un análisis y posterior reporte a la entidad encargada de control de vertimientos.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



- Se logró realizar una caracterización parcial de la calidad del agua residuales del alcantarillado del Barrio Santa Inés, zona Nororiental de Tunja en periodos seco y periodo de lluvia, observando que los resultados medición de los parámetros indican que hay un aumento considerable de contaminantes en periodo de lluvia a excepción del pH que debido a la poca intensidad del evento de lluvia que tanto en periodo seco como de lluvia siguen dentro del rango establecido para facilidad del tratamiento biológico.
- Al analizar el comportamiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas medidas a lo largo de la red de alcantarillado de la zona Nororiental – Barrio Santa Inés de Tunja, en los tres puntos evaluados se evidencia que existe uniformidad espacial de los parámetros analizados ya que hay poca variabilidad en cuanto a los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo.
- De acuerdo con la caracterización obtenida de la descarga del sector de alcantarillado y contrastando los resultados obtenidos con los estándares establecidos en la normativa vigente en Colombia para vertimientos, se evidencia que los valores límites máximos permitidos son superados durante el periodo seco y durante el periodo de lluvia se encuentran cercanos al limite establecido, concluyendo así la importancia de realizar un tratamiento al agua residual previo a un vertimiento y así evitar un alto impacto económico y/o ambiental.
- Se lleva a cabo el diseño del modelo hidrodinámico de calidad de drenaje urbano del sector Nororiental de Tunja – Barrio Santa Inés, calibrado y validado a través del software SWMM 5.1, a partir de los datos obtenidos en campo. La implementación del modelo permitió concluir que el alcantarillado de la ciudad de Tunja a pesar de ser combinado confirmando así que el agua residual proveniente del alcantarillado de la zona de estudio requiere de un previo tratamiento para realizar el vertimiento.
- Aproximadamente un 50% de las tuberías de concreto existentes en la red tienen una probabilidad de generar sulfuro de hidrogeno por lo que es necesario establecer una solución adecuada para evitar perjuicios de salud a la población de la zona de estudio.
- La fórmula Z ha sido generalmente exitosa en la predicción de la ocurrencia de problemas de sulfuros en las alcantarillas de gravedad, pero todavía existe un grado de incertidumbre. Por ejemplo, se ha encontrado que el sulfuro está presente en una



alcantarilla con un valor Z tan bajo como 6000 y ausente en un sistema con un Z de 28000, por lo que es necesario realizar un análisis de campo periódico a las tuberías.

## **REFERENCIAS**

*MODELACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DEL DRENAJE URBANO, EN SOFTWARE SWMM,  
SECTOR NORORIENTAL - SANTA INÉS - TUNJA.*

*MYLP| Ingeniera Civil  
Msc Hidroambiental*



- Alcaldía Mayor de Tunja. (22 de Octubre de 2018). Obtenido de <http://www.tunjaboyaca.gov.co/tema/municipio>.
- Amaya, E. (2019). *Modelización Hidráulica de Drenaje Urbano. Aplicación Sector Nororiental Distrito Santa Inés Tunja – Boyacá*. Tunja: Universidad Santo Tomas.
- Amaya, E., & Cortes, M. (2020). *Hydraulic Modeling of Urban Drainage. Implementation in the Northeast Sector, Santa Ines District, Tunja - Boyaca*. Universidad de Antioquia.
- American Concrete Pipe Association. (1998). *Concrete Piper Handbook*. United States of America.
- Arenas, G. (2004). *Modelacion de la calidad del agua en un rio de montaña Colombiana (Quebrada La Lejia)*. Bogota D.C: Universidad de los Andes.
- Barro, J., Suarez, J., & Puertas, J. (2015). *Caracterizacion de los Desbordamientos de Sistemas Unitarios (DSU) desde Tanques de Tormenta y Analisis de su Eficiencia*. Coruña: Asociacion Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.
- Bas, E. (11 de Mayo de 2017). *Aguas Residuales*. Obtenido de <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/que-es-y-como-combatir-el-sulfuro-de-hidrogeno-h2s-o-gas-de-alcantarilla-9kMea#:~:text=El%20sulfuro%20de%20hidr%C3%B3geno%20es,efectos%20adversos%20para%20la%20salud>.
- Berroeta Bustos, C., Santiabañez González, S., Clarys, P., & Diericks, M. (2000). Modelación Hidrodinámica de Redes de Alcantarillado-Experiencia Piloto en EMOS S.A. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1-13.
- Biblioteca UDEP. (2008). *Modelación Hidraulica*.
- Cesario, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. Denver, CO, USA: American Water Works Association.
- CIMCOOL. (2004). *Reporte Tecnico: Oxigeno Disuelto*. Queretaro: Milacron Mexicana Sales.
- Cortes, M., & Vera, E. (2019). *Durability Considerations for Mitigating Corrosion Caused by Biogenic Sulfuric Acid in Sewerage System*. Journal of Physics: Conference Series.
- Cortes, M., & Vera, E. (2019). *Methodology for Simulating the Process of Microbiologically Induced Degradation of Concrete by Chemical Exposure of Speccimens under Controlled Laboratory Conditions*. Journal of Physics: Conference Series.
- Cortes, O. (2007). *Modelacion de la calidad de agua en sistemas de distribucion de agua potable en periodo extendido*. Bogota, D.C: Universidad de los Andes.
- Ditmars, J., Adams, E., Bedford, K., & Ford, D. (1987). Performance Evaluation of Surface Water Transport and Dispersion Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 961-980.
- Environmental Protection Agency, United States. (2009). *Storm Water Management Model, Applications Manual*. Cincinnati: National RiskManagement Research Laboratory.
- Espigares, M., & Perez, J. (s.f.). *Composicion de Aguas Residuales*. Salamanca: Centro de Investigacion y Desarrollo Tecnologico del Agua de la Universidad de Salamanca.
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). *Diseño Hidrológico*. Zaragoza: Water Assessment & Advisory Global Network.



- Gerencia de Planeación y Construcciones. (2017). *Consolidación Plan Maestro de Drenaje Urbano*. Tunja.
- Gironas, J. R., Rossman, L., & Davis, J. (2009). *Storm water Management Model. Applications manual, EPA/600/R-09/077*. United States Environmental Protection Agency.
- Gomez, M. (2007). *Problema de Calidad de las Aguas Receptoras en Caso de Vertidos desde Colectores Unitarios*. Barcelona: Universidad de Catalunya.
- Huber, W., & RE., D. (1988). *Storm water managment model*. EE.UU.
- Lenntech. (2003). *Sulfatos*. Holanda.
- Lopez Cualla, R. A. (2004). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Microlab Industrial. (20 de Febrero de 2015). *Aguas Residuales*. Obtenido de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/analisis-comparativas-y-relaciones-entre-la-dbo-dqo-cot>
- Ministerio de Ambiente y Agua. (2015). *Guia para la Toma de Muestras de Agua Residual*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolucion Numero 0631*. Bogota: Republica de Colombia.
- National Risk Management Research Laboratory. (2005). *Manual de SWMM 5*. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos (GMMF).
- Obermann, M., Rosenwinkel, K., & Torunoud, M. (2009). *Investigation of First Flushes in a Medium - Sized Mediterranean Catchment*. Journal of Hydrology.
- Perez Carmona, R. (2013). *Diseño y construcción de alcantarillados sanitario, pluvial y drenaje en carreteras*. Bogota: Ecoe Ediciones.
- Prensa Alcaldía de Tunja. (08 de Febrero de 2017). *Alcaldia de Tunja*. Recuperado el 20 de Abril de 2017, de <http://www.tunja-boyaca.gov.co/index.shtml?x=26488>.
- Roca, R. (2012). *Estudio de la Eliminación y de la Prevención de la Generación de Sulfuros en Redes de Saneamiento*. Universidad Politecnica de Cartagena.
- Rodriguez, J. P. (2005). *Desarrollo y aplicación de un modelo de calidad del agua del interceptor Fucha-Tunjuelos-Canoas*. Bogota D.C: Universidad de los Andes.
- Rodriguez, N. (2014). *Modelación integrada de la calidad del agua del río Bogotá y el sistema de drenaje urbano de la ciudad de Bogotá*. Bogota, D.C: Universidad de los Andes.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Santiago de Tunja, Tesoro Colonial, la muy Noble y Leal. (2007). Obtenido de <http://viracachaboyaca.jimdo.com/tunja-la-noble-y-leal>.
- Seco, I. (2016). *Contaminantes y contaminación en el agua. Modelación de procesos ambientales*. Tunja.
- Seco, I., & Gomez, M. (2011). Aplicación del modelo SWMM 5.0 para la Estimación del Arrastre de Depósitos de Sedimentos y Contaminantes Asociados en Sistemas de Alcantarillado Unitario. *Spain National Young Water Professional Concerence*. 2011.
- Sharon, J. (1989). *Combined sewed overflow pollution abatement*. Virginia, EE.UU.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia. (s.f.). *IDEAM*. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/web/siac/calidadagua>
- Tejero, J., & Temprano, J. (1993). *Contaminación de la escorrentía superficial*. Universidad de Cantabria.



- Universidad de Jaen. (2016). *Analisis de Aguas*.
- Valiron, F., & Tabuchi, J. (1992). *Maitrise de la pollution urbaine for temps de pluie, etade*. Paris.
- Withman College. (2011). *Solidos Totales*. Washington.