



**PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL
AGUA RESIDUAL EN EL MUNICIPIO DE PACHO, CUNDINAMARCA**

**Santiago Bustos Colmenares
Jaime Orlando Sánchez Mendieta**

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 16 de Octubre de 2019

PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN EL MUNICIPIO DE PACHO, CUNDINAMARCA

**Santiago Bustos Colmenares
Jaime Orlando Sánchez Mendieta**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
Carlos Andrés Peña Guzmán

Línea de Investigación:
Manejo integral del recurso hídrico

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2019

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

A mis padres por brindarme su apoyo y amor incondicional a lo largo de mi vida y a mi hermano por los consejos y palabras de aliento que hicieron de mí una mejor persona.

SANTIAGO BUSTOS COLMENARES

A mis padres, su apoyo incondicional.

JAIME ORLANDO SÁNCHEZ MENDIETA

Agradecimientos

Agradezco a cada uno de los docentes que me aportaron año tras año conocimientos necesarios para culminar mi carrera profesional en la institución de la Universidad El Bosque y a cada uno de mis compañeros que puedo llamar amigos que me acompañaron en esta travesía.

SANTIAGO BUSTOS COLMENARES

A cada docente que me aportó una parte de su conocimiento para mi formación. A mis amigos. Al profesor Juan Pablo Rodríguez Miranda por su colaboración para el desarrollo de este proyecto.

JAIME ORLANDO SÁNCHEZ MENDIETA

1 Tabla de Contenido

1 Tabla de Contenido	1
2 Listado de Tablas	3
3 Listado de Figuras	6
4 Listado de Ecuaciones	6
5 Resumen	7
6 Abstract	7
7 Introducción	8
8 Planteamiento del problema	9
8.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	10
8.2 HIPÓTESIS	10
9 Justificación	11
10 Objetivo general y específicos	12
10.1 Objetivo General	12
10.2 Objetivos Específicos	12
11 Marcos de referencia	13
11.1 Antecedentes	13
11.2 Estado del arte	14
11.3 Marco conceptual	15
11.4 Marco teórico.....	17
11.4.1 Generación de Aguas Residuales y su importancia	17
11.4.2 Fuentes de Generación y Puntos de Vertimiento	17
11.4.3 Periodo de Diseño	17
11.4.4 Población de Diseño	18
11.4.5 Tasa de Crecimiento Poblacional	18
11.4.6 Modelación Matemática del Oxígeno Disuelto (OD).....	18
11.4.7 Ubicación de la una Planta de tratamiento de aguas residuales	19
11.4.8 Composición de las aguas residuales	19
11.4.9 Calidad requerida en el efluente de la Planta.....	19
11.4.10 Selección de una PTAR.....	19
11.5 Marco geográfico	20
11.6 Marco institucional	22
11.7 Marco normativo	22

12 Marco metodológico	24
12.1 Enfoque	24
12.2 Alcance	25
12.3 Metodología primer objetivo	25
12.4 Metodología segundo objetivo	27
12.4.1 Proyección de población	28
12.4.2 Determinación de demanda y generación de aguas residuales	29
12.4.3 Simulación DBO5 y OD	33
12.4.4 Proyección de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	35
12.4.5 Comparación de las descargas de vertimientos puntuales con los valores máximos permisibles de la Resolución 631 de 2015	36
12.4.6 Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con la DBO5	37
12.5 Metodología Tercer objetivo	37
13 Plan de Trabajo	44
13.1 Cronograma de actividades según objetivo planteado.	44
13.2 Presupuesto contemplado del proyecto	45
14 Aspectos éticos	45
15 Resultados	46
15.1 Resultados primer objetivo.....	46
15.1.1 Descripción de la zona	46
15.1.2 Usos del Suelo y actividades Económicas Predominantes	47
15.1.3 Estado del alcantarillado del municipio de Pacho, Cundinamarca y sus vertimientos.	48
15.2 Resultados segundo objetivo	56
15.2.1 Población existente y proyectada cabecera municipal	56
15.2.2 Descarte de Métodos de Proyección Poblacional	58
15.2.3 Población Proyectada Determinada.....	58
15.2.4 Tasa de Crecimiento Poblacional Anual Proyectada.....	59
15.2.5 Cálculo de la demanda de agua.....	59
15.2.6 Caudal medio diario	62
15.2.7 Caudal máximo horario.....	62
15.2.8 Caudal de conexiones erradas.....	63
15.2.9 Caudal por infiltración.....	63

15.2.10 Caudal de Diseño	64
15.2.11 Modelación matemática de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Oxígeno Disuelto (OD)	65
15.2.12 Posibles afectaciones en consecuencia de los vertimientos	69
15.2.13 Proyección de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	69
15.2.14 Comparación de las descargas de vertimientos puntuales con los valores máximos permisibles de la Resolución 631 de 2015.....	70
15.2.15 Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	72
15.3 Resultados tercer objetivo	73
15.3.1 Selección de un Sistema de Tratamiento apropiado para el contexto municipal.....	73
15.3.2 Calidad del agua residual tratada	77
15.3.3 Aspectos de Localización de la Planta.....	78
15.3.4 Desarrollo de metodología de selección de tecnologías.....	84
15.3.5 Diseño de la Planta de Tratamiento del agua residual	94
15.3.6 Control de olores en la planta	113
15.3.7 Tratamiento y Aprovechamiento del biogás generado	113
15.3.8 Personal	113
16 Conclusiones	114
17 Recomendaciones	116
18 Referencias Bibliográficas.....	117

2 Listado de Tablas

Tabla 1. Clasificación de complejidad por población.....	27
Tabla 2. Periodo de diseño de una PTAR según nivel de complejidad	27
Tabla 3. Métodos de proyección validos según nivel de complejidad.....	28
Tabla 4. Métodos de proyección.....	28
Tabla 5. Dotación neta máxima según altura sobre nivel del mar.....	29
Tabla 6. Coeficiente de retorno según nivel de complejidad	29
Tabla 7. Consumo de agua para el sector comercial.....	30
Tabla 8. Consumo de agua sector institucional	30
Tabla 9. Consumo de agua sector salud y seguridad	31
Tabla 10. Consumo de agua sector hotelero.....	31
Tabla 11. Consumo de agua sector industrial.....	31
Tabla 12. Rango de consumo distintas industrias.....	32

Tabla 13. Ecuaciones de medición de caudales.....	32
Tabla 14. Tasa total de remoción y tasa de descomposición.....	33
Tabla 15. Balance de masas/Concentración DBO5.....	33
Tabla 16. Determinación de DBO5 en una distancia determinada.....	34
Tabla 17. Déficit de oxígeno.....	34
Tabla 18. Oxígeno de saturación.....	34
Tabla 19. Oxígeno disuelto.....	35
Tabla 20. Ecuaciones de proyección de carga y concentraciones (DBO5 y SST).....	36
Tabla 21. Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	37
Tabla 22. Interpretación de la relación de la DQO con la DBO5.....	37
Tabla 23. Cualificación para cada parámetro.....	39
Tabla 24. Matriz de selección de tecnologías.....	39
Tabla 25. Identificación de vertimientos relevantes a cuerpos de agua y sus coordenadas.....	49
Tabla 26. Caracterización 6 vertimientos priorizados.....	50
Tabla 27. Caracterización Río Rute (San Antonio).....	51
Tabla 28. Caracterización Río Batán.....	51
Tabla 29. Valores sugeridos por RAS 2017. Aportes Per Cápita Aguas residuales Domésticas.....	52
Tabla 30. Caracterización de cargas contaminantes por vertimiento DBO5 y SST 2018.....	52
Tabla 31. Objetivos de calidad para la cuenca alta del Río Negro 2020.....	53
Tabla 32. Parámetros máximos permisibles en aguas residuales de los prestadores del servicio de alcantarillado igual o mayor a 625 kg/día y menor a 3000 kg/día.....	53
Tabla 33. Registro visita técnica realizada a los 6 principales puntos de vertimiento en el municipio.....	54
Tabla 34. Estimación de poblaciones de cabecera y flotante para el 2019.....	56
Tabla 35. Censo Poblacional para el Departamento de Cundinamarca, año 1951.....	57
Tabla 36. Proyecciones poblacionales.....	58
Tabla 37. Cálculo del caudal comercial.....	60
Tabla 38. Cálculo del caudal escolar.....	60
Tabla 39. Cálculo consumo sector salud.....	61
Tabla 40. Cálculo consumo sector seguridad.....	61
Tabla 41. Cálculo consumo en hoteles.....	61
Tabla 42. Cálculo consumo industrial.....	62
Tabla 43. Cálculo consumo industrial tipo químico.....	62
Tabla 44. Aportes por infiltración en redes de sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales.....	64
Tabla 45. Resultado del desarrollo de la modelación Río Negro/Rute/San Antonio.....	65
Tabla 46. Resultado del desarrollo de la modelación Río Batán.....	67
Tabla 47. Proyecciones de carga/Datos de partida.....	70
Tabla 48. Comparación de los vertimientos puntuales con la Resolución 631 de 2015.....	71
Tabla 49. Fracción de DBO5 con respecto a la DQO en puntos de vertimientos priorizados.....	72
Tabla 50. Clasificación de aguas residuales crudas.....	74
Tabla 51. Clasificación de aguas residuales cruda año 2044.....	74
Tabla 52. Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías.....	75
Tabla 53. Eficiencias de alternativas 1 y 2 de tratamiento.....	76
Tabla 54. Eficiencias de alternativa 3 de tratamiento.....	77
Tabla 55. Criterios de Calidad del agua residual tratada.....	77

Tabla 56. Opciones de tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales	85
Tabla 57. Matriz de comparación de tratamientos biológicos	86
Tabla 58. Rendimiento comparativo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	86
Tabla 59. Rendimiento comparativo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	87
Tabla 60. Cualificación aplicable a la matriz de análisis	87
Tabla 61. Matriz de análisis de la primera alternativa de tratamiento	88
Tabla 62. Matriz de selección de tecnologías. Primera Alternativa.....	89
Tabla 63. Matriz de análisis de la segunda alternativa de tratamiento.....	90
Tabla 64. Matriz de selección de tecnologías. Segunda Alternativa.....	91
Tabla 65. Matriz de análisis de la tercera alternativa de tratamiento.....	92
Tabla 66. Matriz de selección de tecnologías. Tercera Alternativa	93
Tabla 67. Ecuaciones y criterios utilizados en aliviadero.	95
Tabla 68. Datos obtenidos del desarrollo de ecuaciones y proyecto.....	96
Tabla 69. Dimensionamiento obtenido a partir del desarrollo de ecuaciones para aliviadero.	96
Tabla 70. Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del Cribado parte 1.....	97
Tabla 71. Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del Cribado parte 2.....	98
Tabla 72. Parámetros obtenidos del desarrollo de las ecuaciones para Cribado Grueso	98
Tabla 73. Criterios utilizados en el Cribado.....	99
Tabla 74. Parámetros obtenidos del desarrollo de las ecuaciones para Cribado Fino	99
Tabla 75. Ecuaciones de diseño para Trampa de Grasas.	100
Tabla 76. Características a cumplir por la trampa de grasas	101
Tabla 77. Resultados obtenidos del desarrollo de las ecuaciones.....	101
Tabla 78. Guía de cálculo para el sedimentador primario parte 1	103
Tabla 79. Guía de cálculo para el sedimentador primario parte 2	104
Tabla 80. Diseño del sedimentador primario parte 1 Fuente. Autores.....	104
Tabla 81 Diseño del sedimentador primario parte 2.....	105
Tabla 82. Guía de cálculo para el RAFA parte 1.....	105
Tabla 83. Guía de cálculo para el RAFA parte 2 Fuente. Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.....	106
Tabla 84. Guía de cálculo para el RAFA parte 3 Fuente. Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.....	107
Tabla 85. Guía de cálculo para el RAFA – Separador GSL.....	108
Tabla 86. Diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente parte 1.	108
Tabla 87. Diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente parte 2.	109
Tabla 88. Guía para el cálculo del FAFA parte 1	111
Tabla 89. Guía para el cálculo del FAFA parte 2.....	112
Tabla 90. Diseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	112

3 Listado de Figuras

Figura 1. Árbol de Problemas.....	10
Figura 2. Casco urbano municipal	20
Figura 3. Proceso Cuantitativo	25
Figura 4. Diagrama de flujo metodología a seguir.	40
Figura 5. Metodología del primer objetivo	41
Figura 6. Metodología del segundo objetivo.	42
Figura 7. Metodología del tercer objetivo	43
Figura 8. Cronograma de actividades según objetivo planteado	44
Figura 9. Presupuesto contemplado del proyecto	45
Figura 10. Plano usos del suelo Pacho Cundinamarca Fuente. PBOT Pacho, 2000.....	47
Figura 11. Red de Alcantarillado de Pacho clasificado.	48
Figura 12. Ubicación de los puntos de vertimiento priorizados en Pacho.	55
Figura 13. Modelación de DBO5 a lo largo del río Negro.....	66
Figura 14. Modelación de OD a lo largo del río Negro	67
Figura 15. Modelación de DBO y OD a lo largo del río Batán	68
Figura 16. Comparación de la concentración en puntos de vertimiento priorizados con Res 631/2015 (año 2018)	71
Figura 17. Ubicación destinada para la PTAR del municipio.	78
Figura 18. Evidencia de distancia entre ubicación planteada y asentamientos	79
Figura 19. Inclinación media del terreno	80
Figura 20. Área del predio destinado para la Planta	80
Figura 21. Zonas de Amenazas y Riesgos.....	82
Figura 22. Dirección de procedencia del Viento. Año 2015.	84
Figura 23. Esquema de la configuración de la Planta.	94

4 Listado de Ecuaciones

Ecuación 1. Caudal de agua residual domestica	29
Ecuación 2. Cálculo de selección de tecnologías	38
Ecuación 3. Cálculo de la Tasa de Crecimiento Poblacional Anual	59
Ecuación 4. Cálculo de la Tasa de Crecimiento Poblacional Anual desarrollado	59
Ecuación 5. Caudal de aguas residuales domésticas.....	59
Ecuación 6. Cálculo del Caudal medio diario (QMD).....	62
Ecuación 7. Cálculo del factor de mayoración.	63
Ecuación 8. Cálculo del Caudal máximo horario.	63
Ecuación 9. Cálculo de caudal aportado por conexiones erradas	63
Ecuación 10. Cálculo del caudal de infiltración	64
Ecuación 11. Cálculo del caudal de diseño	64

5 Resumen

La degradación del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Negro debido a la carencia de un sistema de tratamiento de las Aguas Residuales ha generado una problemática ambiental, social y económica en el municipio de Pacho en Cundinamarca, la cual se debe a la existencia de vertimientos directos de aguas crudas a los principales cuerpos superficiales del municipio, siendo los más afectados en términos de aporte de Agua Residual per cápita el Río Rute (San Antonio) y el Río Batán, los cuerpos hídricos principales de Pacho (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017). El área crítica identificada fue el casco urbano debido a la gran cantidad de descargas en el lugar, que deterioran la calidad del recurso hídrico al que tienen acceso las veredas del municipio aguas abajo, así como su crecimiento demográfico acelerado (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017). A partir de la problemática identificada, en este trabajo de grado se propuso el Diseño de un Sistema de Tratamiento del Agua Residual del Casco Urbano, eficiente y sustentable para las condiciones socioeconómicas y territoriales del municipio. En primer lugar, se comenzó con la recolección de los datos de partida como el estado (línea base) de la zona en términos de vertimientos y de sistemas de alcantarillado presentes (Lozano, 2012). Fueron comparados los aportes de las descargas en términos de mg/L para DBO5 y SST de los seis puntos de vertimientos priorizados por el PSMV del año 2017 con los límites máximos permisibles estipulados en la resolución 631 de 2015, evidenciándose que se supera con creces la normativa ambiental vigente y consecuencia de esto, fue constatada la importancia y necesidad de la realización de un proyecto de esta índole. Se seleccionaron tecnologías de tratamiento adecuadas para el contexto municipal en sus diferentes niveles (territorial, ambiental, técnico, económico y social) con base en la metodología “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales” (Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015) para la propuesta de diseño de la PTARM, obteniéndose conclusiones acerca del cumplimiento de los objetivos propuestos, así como recomendaciones enfocadas a las consideraciones a tomar en cuenta para lograr un apropiado rendimiento operativo.

Palabras clave: Tratamiento del Agua, Proyección, Modelamiento, Dimensionamiento, Aguas Residuales Municipales, Oferta Hídrica.

6 Abstract

The degradation of water resources in the upper basin of the Negro river due to the lack of a wastewater treatment system has generated an environmental, social and economic problem in the municipality of Pacho in Cundinamarca, which is due to the existence of direct discharges of raw water to the main superficial bodies of the municipality, being the most affected in terms of contribution of Residual Water per capita, the Rute River (San Antonio) and the Batán River, the main water bodies of Pacho (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017). The critical area identified was the urban center due to the large number of wastewater discharges, which deteriorate the quality of the water resource to which the downstream townships have access, as well as its accelerated population growth (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017). Based on the problem identified, in this graduation project the Design of a Wastewater Treatment System of the Urban Area was proposed, efficient and sustainable for the socioeconomic and territorial conditions of the municipality. In the first place, the starting data was collected as the state (baseline) of the area in terms of wastewater and sewage systems present (Lozano, 2012). The contributions of the discharges in terms of mg / L for BOD5 and TSS of the six priority pour points prioritized by the PSMV of 2017 were compared with the maximum permissible limits stipulated in resolution 631 of 2015, evidencing that the current environmental regulations are far exceeded and as a consequence of this, the importance and necessity of carrying out such a project was confirmed. Appropriate treatment technologies were selected for the municipal context at their different levels (territorial, environmental, technical, economic and social) based on the methodology “Selection of technologies for municipal wastewater treatment” (Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015) for the design proposal of the PTARM, obtaining conclusions about the fulfillment of the proposed objectives, as well as recommendations focused on the considerations to be taken into account to achieve an appropriate operational performance.

Keywords: Water treatment, Projection, Modeling, Dimensioning, Raw Wastewater, Water Supply.

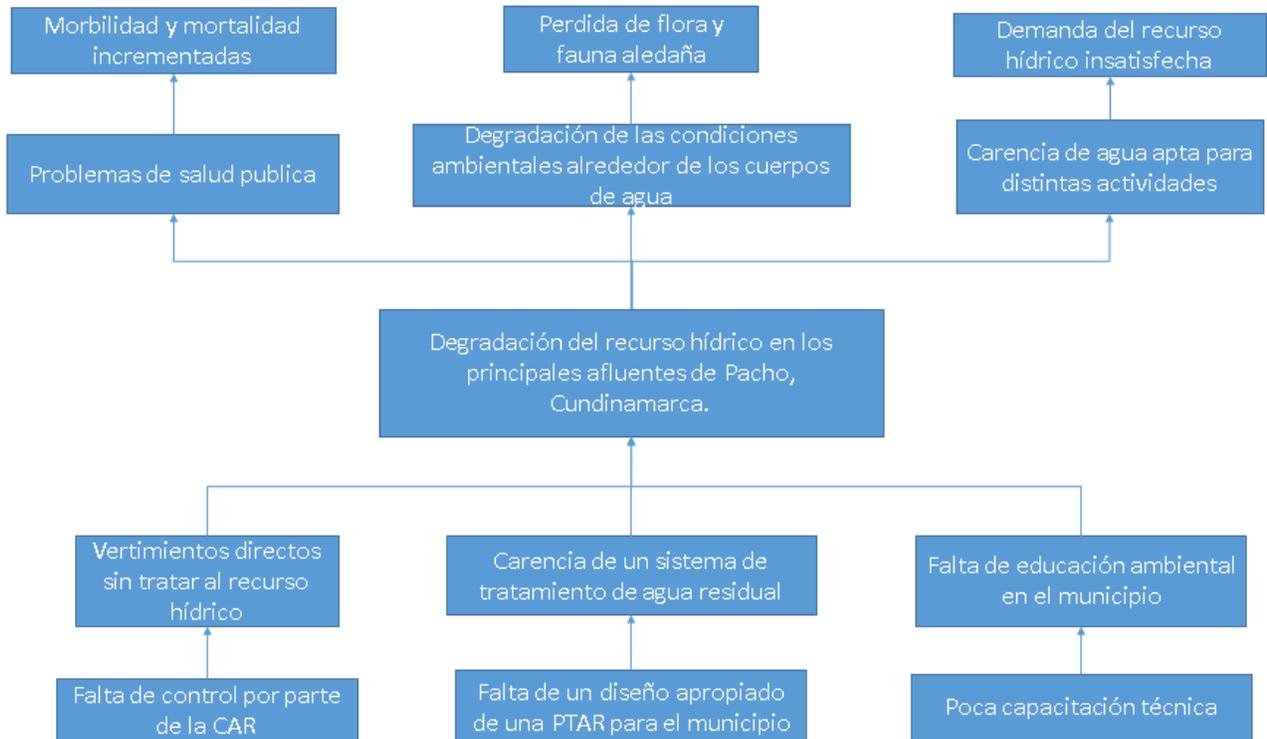
7 Introducción

La generación de aguas residuales puede llevar a la ocurrencia de graves problemas de salud pública, debido principalmente a que estas aguas albergan variedad de microorganismos patógenos tales como virus, bacterias y protozoos que son generadores de graves enfermedades en el ser humano. La diarrea y la gastroenteritis son unas de las principales causas de mortalidad en Latinoamérica; la utilización de agua no apta para el consumo humano, como resultado del manejo y tratamiento inadecuado o la inexistencia de este para las aguas residuales, es responsable de la mayoría de dichas muertes. Este problema se relaciona también de una forma directa con enfermedades consecuencia de agua no segura tales como el cólera, hepatitis, disentería, gastroenteritis entre otras. (Reynolds, K. A, 2001, p. 1). De igual manera el agua residual también acarrea problemas tales como la alta presencia de nitrógeno, sobre todo en aguas provenientes del aprovechamiento en el sector agrícola e industrial, usos al recurso muy comunes en el lugar de estudio. La presencia de dicho elemento y sus compuestos derivados en el agua tales como amonio, nitrato y nitrito causan problemas de toxicidad a los organismos que habitan los ecosistemas acuáticos, así como acelerar el proceso de eutrofización de los cuerpos hídricos, reduciendo así la cantidad de oxígeno disuelto y finalmente la calidad del recurso. (Cervantes-Carrillo, F.,2000, p. 1).

Está investigación consiste en la determinación de la mejor opción para llevar a cabo la propuesta para un sistema de tratamiento del Agua Residual, la cual debe tener en cuenta las limitaciones existentes en un escenario de implementación real, tales como recursos limitados, complejidad de la adquisición de reactivos, dificultades de operación de la planta, recurso humano con el que se cuenta, condiciones climáticas, telúricas, edafológicas y de adquisición de terrenos, posibles impactos a comunidades aledañas (olores) así como para los ecosistemas presentes. El desarrollo de esta investigación es relevante para los pobladores, debido a que estos sufren en su cotidianidad el deterioro de la oferta hídrica que disponen los cuerpos de agua existentes, debido a la falta de sistemas de tratamiento del Agua Residual. Así mismo, este estudio también es importante para las entidades presentes en la zona tales como la Alcaldía, la CAR, el Acueducto Local, la Secretaría de Planeación y las Empresas Públicas de Pacho a quienes, por medio de visitas técnicas realizadas al territorio, se les informó sobre la intención de realizar este estudio. Estas entidades demostraron su interés y manifestaron la importancia, de tener en cuenta los resultados de este estudio como un punto de vista para la formulación de un proyecto a futuro, para la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, el cual se viene en la actualidad adelantando. Se proponen los objetivos de verificar el estado de la línea base en la que se evidencie el estado actual de la red de alcantarillado y los puntos de vertimientos directos a los cuerpos de agua, evaluar las características físicas, químicas y biológicas presentes en los vertimientos realizados en el municipio a los principales cuerpos hídricos (río Rute y Batán) y por último definir el sistema de tratamiento más adecuado para el contexto territorial, socioeconómico, técnico y ambiental, así como calcular el dimensionamiento del mismo. Este proyecto de investigación genera un aporte directo a la alcaldía municipal de Pacho para el desarrollo de la PTAR que se propone. También se establece como un insumo para el desarrollo de proyectos en poblaciones con similitudes al seleccionado para este proyecto de investigación, tanto para la comunidad académica como para las organizaciones y demás entidades.

8 Planteamiento del problema

El elevado crecimiento demográfico en el municipio de Pacho en los últimos años ha generado aumento en la demanda hídrica por parte de los pobladores y, a su vez, también ha magnificado la descarga de forma directa a las fuentes hídricas existentes en la cabecera municipal. En concreto, en el casco urbano existen 24 vertimientos de forma directa a las fuentes hídricas y 4 sectores que no poseen cobertura de la red de alcantarillado y hacen descargas puntuales en diferentes lugares de estos cuerpos naturales, según el plan de desarrollo del municipio 2016-2019 (Consejo Municipal de Pacho, 2016, p. 46.). Asimismo, el sistema de alcantarillado que existe en el municipio no cuenta con ningún sistema de tratamiento de las aguas residuales que se generan, por lo que la descarga de estas aguas se realiza sin tratamiento alguno en ocho efluentes que pertenecen al casco urbano. En este orden de ideas, se realizan descargas de vertimientos en varios puntos de los Ríos San Antonio y Batán, así como en las Quebradas los Copetones, Gotaque, Quebraditas, entre otras. (Consejo Municipal de Pacho, 2016, p. 46.) Existe afectación al sector rural del municipio de igual manera, debido a que dicha población al no contar con una red de distribución directa del recurso en la totalidad de sus veredas se ven en la necesidad de recoger agua de los cuerpos hídricos contaminados. (Consejo Municipal de Pacho, 2016, p. 47). Los vertimientos existentes van en aumento ya que en base a lo estipulado en el PSMV de 2017 se da un recuento de 27 para el año 2018, evidenciando que al paso del tiempo se han visto incrementados estos puntos de vertimiento de aguas residuales sin tratar ya que, en el 2016, como se mencionó anteriormente, se contaban con 24 puntos de vertimiento. En el plan de desarrollo se listan 8 cuerpos de agua que están siendo afectados por estos vertimientos que están divididos en 20 puntos conectados a la red de alcantarillado y otros 7 vertimientos que no cuentan con una red de alcantarillado, estos 7 últimos están siendo vertidos hacia el suelo, según la consultora 2016 - 2017. La contaminación del agua se ve agravada debido a que el alcantarillado cuenta con tramos combinados generados por conexiones erradas existentes (Consejo municipal de Pacho, 2016). Con base a lo anterior, la problemática corresponde a la degradación del recurso hídrico en los principales afluentes de Pacho, Cundinamarca, delimitándose la problemática al caso urbano debido a la gran cantidad de vertimientos de origen comercial, institucional y doméstico, así como su alta tasa de crecimiento poblacional, ya que en base a los cálculos realizados a partir de las proyecciones poblacionales existentes, esta cabecera municipal contará con una población de 27679 habitantes para el año 2044, en contra de los 16463 habitantes actuales (Empresas públicas de Cundinamarca, 2017). Se establece por lo tanto la pregunta de investigación: ¿Es posible diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales que mejore la calidad del recurso hídrico al que tienen acceso los pobladores de Pacho y que sea eficiente para las condiciones ambientales y socioculturales que se presentan en la zona?



Fuente: Elaboración propia, con base al PSMV Pacho, Cundinamarca (2018) y el PBOT para el Municipio de Pacho (2000).

Figura 1. Árbol de Problemas

8.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales que mejore la calidad del recurso hídrico al que tienen acceso los pobladores de Pacho, Cundinamarca, y que sea eficiente para las condiciones socioeconómicas, ambientales, técnicas y territoriales que se presentan en el casco urbano?

8.2 HIPÓTESIS

H₀: La propuesta del diseño de un Sistema de Tratamiento de aguas residuales para el casco urbano de Pacho, Cundinamarca le permitirá al mismo tomar decisiones acerca de su implementación con el fin de dar solución a las problemáticas asociadas a la inexistencia de este.

H_a: La propuesta del diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el casco urbano de Pacho, Cundinamarca no le aportará la información suficiente para tomar decisiones acerca de su implementación con el fin de dar solución a las problemáticas debido a la inexistencia de este.

9 Justificación

Fue evidenciable a través de la construcción de la problemática la necesidad de un Sistema de Tratamiento del agua residual, siendo este un proyecto de relevancia y que ya ha sido puesto sobre la mesa en el Plan de Desarrollo Municipal, así como el PSMV de Pacho, la demanda de un sistema de tratamiento va en aumento al ser una población bastante dinámica en su crecimiento tanto demográfico como comercial, institucional e industrial, lo que se puede traducir como mayores descargas a las fuentes hídricas con el paso del tiempo. Este Proyecto de Grado puede ser aprovechado por la administración local como insumo para la futura implementación de una PTAR, beneficiando a la población objetivo, su proyección al periodo de diseño, su demanda hídrica y el tratamiento de sus vertimientos, además que teniendo en cuenta que la cabecera municipal de Pacho se encuentra a una altitud de 2136 m.s.n.m (Empresas públicas de Cundinamarca, 2017) y que hay presencia de comunidades aguas abajo conformadas por las veredas municipales que demandan la disponibilidad de un recurso hídrico de calidad para sus actividades cotidianas, es evidente la importancia de ofrecer un sistema de tratamiento para dichas descargas presentadas en la actualidad al río principal, el cual es el Río Negro, de modo que no se comprometa la calidad del recurso para poblaciones que capten el recurso hídrico en un nivel inferior.

Es viable el diseño de un Sistema de Tratamiento del agua que se ajuste a las condiciones socioeconómicas y territoriales del municipio de Pacho, Cundinamarca, específicamente en su cabecera municipal, donde como lo indica el alcalde Ronald Rangel en su Plan de Desarrollo Municipal, no existe una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales y no se tiene una cobertura completa de la demanda hídrica para la totalidad de los 16.463 habitantes del casco urbano aproximadamente para el año en curso según el DANE (Consejo Municipal de Pacho, 2016) (DANE, 2017). Como fue mencionado con anterioridad, el municipio cuenta con una problemática ambiental debido a la falta de tratamiento de los vertimientos de aguas residuales crudas que descargan a lo largo de los cuerpos superficiales presentes en la cabecera municipal, generadoras de una problemática de salud pública, sanciones por parte de la Corporación autónoma Regional de Cundinamarca debido al incumplimiento de la normativa vigente (Resolución 631 de 2015), así como deterioro de los ecosistemas aledaños por efectos de los aportes de cargas contaminantes a los afluentes receptores (IDEAM, 2010).

El perfil del ingeniero ambiental cumple con la formación requerida para desarrollar el diseño de un Sistema para el Tratamiento del Agua Residual teniendo en cuenta que se debe realizar un análisis del territorio donde se debe llevar a cabo un estudio desde múltiples enfoques (territorial, ambiental, técnico, económico y social) para dar respuesta a la problemática que existe en el territorio. Desarrollado el diseño del Sistema de Tratamiento del agua, las entidades administrativas de Pacho podrán tomar la decisión de implementarlo con el fin de evitar que se sigan presentando vertimientos directos a 8 efluentes del casco urbano del municipio, principalmente al Río Negro y Batán (Consejo Municipal de Pacho, 2016).

Según el PSMV del año 2017, se estableció que el costo proyectado a largo plazo para la operación de una PTAR equivale a *Trece Mil Cuatrocientos Cuarenta millones Novecientos Treinta y Siete mil pesos \$13.440.937.000* y se postuló un predio con área equivalente a 0.97 hectáreas para erigir dicha obra. Mediante la revisión bibliográfica llevada a cabo para el desarrollo de este Proyecto de Grado, fue evidenciable que existen diversos procesos de tratamiento de las aguas residuales municipales que son ejecutables a moderados costos y que además generan subproductos que pueden ser aprovechados, tales como los lodos y el biogás, recuperando estos residuos para su reincorporación como materia prima a un nuevo proceso productivo como lo puede ser perfectamente un sistema de procesamiento de biogás para

la generación de energía. Asimismo, la identificación en la literatura de sistemas de tratamiento que no requieren grandes extensiones de terreno y que ofrecen eficiencias de remoción adecuadas expuso la tangibilidad de la opción de tratamiento diseñada.

Teniendo en cuenta los recursos tecnológicos y humanos con los que se cuenta, el desarrollo del proyecto es viable, tomando en cuenta la formación obtenida a lo largo del programa académico a la fecha de realización del proyecto y teniendo como director a un profesor con experiencia dirigiendo trabajos de grado con temas relacionados.

La posibilidad de visitar el municipio facilitó la obtención de información de primera mano para el desarrollo del proyecto.

10 Objetivo general y específicos

10.1 Objetivo General

- Diseñar un sistema de tratamiento del agua residual para el casco urbano del municipio de Pacho Cundinamarca, que sea eficiente y sustentable para las condiciones socioeconómicas, ambientales, técnicas y territoriales del municipio y así proponer una solución a la degradación del recurso hídrico en sus principales afluentes.

10.2 Objetivos Específicos

- Establecer la línea base en la que se evidencie el estado actual de la red de alcantarillado y los puntos de vertimientos directos a los cuerpos de agua.
- Evaluar el impacto de los parámetros de calidad del agua criterio (DBO5, SST y OD) presentes en los vertimientos priorizados en la cabecera municipal a los cuerpos superficiales principales (río Rute y Batán) y determinar el tiempo de diseño de la Planta, así como la población proyectada.
- Definir y diseñar el sistema de tratamiento más adecuado para el contexto territorial, socioeconómico, técnico y ambiental.

11 Marcos de referencia

En este apartado se mostrarán los antecedentes con respecto al lugar de estudio, en este caso el perímetro urbano de Pacho, Cundinamarca, que tienen relación con el tratamiento de aguas residuales en la zona. Posteriormente se presentaron artículos que sirvieron para el desarrollo del trabajo de investigación, así como guías metodológicas para el correcto diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales. Se construyó un marco conceptual y teórico exponiendo los términos y teorías utilizados en el desarrollo del trabajo, así como un marco normativo y geográfico para dar un contexto del caso estudio que se evaluó.

11.1 Antecedentes

Dentro del PBOT del año 2000 del municipio de Pacho se encuentran delimitadas las zonas destinadas a uso doméstico o comercial entre otros, por lo que se identificaron con más facilidad la posible ubicación de la planta de tratamiento, así como identificar las zonas con peligro de deslizamiento de tierra o de inundación, ecosistemas estratégicos y zonas recreativas.

En el 2009 la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) establece mediante la Resolución 3461 de 2009, los objetivos de calidad para la cuenca del río Negro en donde se ponen límites para los parámetros de calidad del agua criterio, como lo son la DBO5, SST y DQO entre otros.

Se encuentra la necesidad del diseño de la Planta de Tratamiento de aguas residuales en el Plan de Desarrollo Municipal del periodo 2016-2019, en donde se evidencia la problemática que se está teniendo en el municipio en donde se hacen vertimientos sin ningún tipo de tratamiento a lo largo de los cuerpos hídricos, afectando los principales afluentes del casco urbano, como lo son el río Negro y el río Batán, que se encuentran en la subcuenca alta del río negro (Consejo municipal de Pacho, 2016).

Los documentos encontrados que hacen referencia a una Planta de Tratamiento de agua residual en el municipio de Pacho, Cundinamarca, resultan poco técnicos y sin un componente de selección que demuestre que el diseño se adecúa a las condiciones del municipio, como lo es el caso del trabajo de grado “DISEÑO DE UNA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO A LAS AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS DE OXIDACIÓN EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PACHO – CUNDINAMARCA” por parte de los autores Pinzón C. y González D., en 2015.

Debido a la falta de documentos con similitudes con referencia a Pacho, fueron buscados trabajos de grado de este tipo para municipios similares, como lo es el proyecto de grado titulado: “PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL POR ZANJÓN DE OXIDACIÓN PARA EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ -SANTANDER” autoría de Galeano, L. y Muñoz, K., año 2016, debido a las similitudes en cuanto a la población objetivo (similar cantidad de habitantes) así como la dimensión territorial que se delimita a la cabecera municipal, al igual que en este trabajo de grado.

Se contó con los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) en el municipio de Pacho para los años 2017 y 2018 los cuales presentan un informe de caracterización de los puntos de vertimiento, así como sus ubicaciones y registro fotográfico. También se muestran los presupuestos y la ubicación propuesta para la construcción de la Planta que se planea diseñar a futuro.

11.2 Estado del arte

Dentro de este capítulo son mostrados artículos de importancia para el desarrollo del trabajo de grado y que sirvieron de guía para dar resultados coherentes con los objetivos propuestos.

Resultado de la búsqueda bibliográfica se obtuvieron los siguientes libros y artículos en los que se basó el trabajo.

El libro ***“Fundamentos de Diseño de Plantas Depuradoras de Aguas Residuales”*** del autor William Antonio Lozano Rivas del 2012 contempla en su capítulo 1 denominado “Datos de partida” los contenidos o datos con los que se debe contar antes de iniciar un diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales, entre estos se encuentra la caracterización del origen y naturaleza de las aguas residuales a tratar, el estado de la red de alcantarillado, localización de los puntos de vertimiento, dinámica de la contaminación de los cauces receptores, los objetivos de calidad que se desean alcanzar, una comparación técnica y económica de los posibles sistemas a utilizar en el tratamiento y una vez desarrollados cada uno de estos aspectos dar la selección de la mejor combinación de procesos y conveniencia tecnológica (Lozano, 2012)

En el desarrollo del trabajo se utilizó este último libro como guía para el correcto diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales que se adecue al contexto de Pacho.

Con el fin de conocer el periodo de diseño y la población futura del municipio de Pacho, se consultó el libro ***“Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados”*** del autor Ricardo López Cualla, 1995, en donde en sus capítulos 2 y 3 expone la metodología a seguir para determinar el tiempo a futuro, así como la población a la que el municipio llegará en teoría en este tiempo determinado. Estos datos responden unos de los elementos que hace referencia Lozano cuando se refiere a los datos de partida necesarios para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales y que son de vital importancia para ofrecer un diseño coherente que se adecue a las características del municipio (López, 1995).

Se consultó el libro ***“Surface Water-Quality Modeling”*** del autor Steven C. Chapra del 2008 en donde se encontró la metodología de Streeter-Phelps, la cual expone un modelo con el que es posible observar los cambios a los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua receptor, como la DBO5 y OD, teniendo en cuenta la reaireación del cuerpo de agua y la descomposición de la materia orgánica conforme se vierten aguas residuales sin tratar a lo largo de su trayecto (Chapra, 2018). Esta metodología se implementó en el trabajo y fue con la cual fue posible realizar el modelamiento del río Negro y río Batán, estos modelos permitieron observar el impacto de los vertimientos sobre los principales cuerpos de agua del municipio, así como identificar los puntos críticos del municipio, también evidenció la necesidad del sistema de tratamiento ya que se presentaron modelaciones críticas al compararse con la normativa Colombiana.

El ***“Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico”*** (RAS) del 2017 es la guía en la cual se encuentran los requisitos técnicos con los que debe cumplir cualquier sistema de tratamiento de aguas, ya sea potable o residual. Presenta una serie de posibles tecnologías que pueden

ser implementadas en el territorio Colombiano y sus requerimientos técnicos que se deben cumplir para su óptimo funcionamiento y desarrollo, así mismo presenta que el proyecto debe contar con un diagnóstico detallado de la situación del municipio, determinación de la población afectada, característica socioculturales de la población, cuantificación de la demanda o necesidades y un diagnóstico o evaluación del sistema existente (Minvivienda, 2017). Estos requisitos técnicos se siguieron en el desarrollo de los diseños de la planta, así como la obtención de la información requerida por el RAS para dar un buen sistema de tratamiento de aguas residuales.

Con el fin de dar un mejor concepto y obtener una comparación técnica y económica de los posibles sistemas a utilizar en el tratamiento de las aguas residuales del municipio, se revisó el artículo ***“Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales”*** por el autor Juan Pablo Rodríguez Miranda et al., 2015, en donde son consolidadas eficiencias de remoción de contaminantes por diferentes tecnologías, indicadores como el consumo de energía, costo de inversión, operación, área posible construida o producción de lodos, aspectos para la localización de una PTAR y por último la metodología para la selección de una planta de tratamiento de aguas residuales que se adecue a las condiciones del municipio en el que se requiera, en este caso Pacho, Cundinamarca.

Este último artículo dio las herramientas necesarias para otorgar un análisis coherente con las condiciones del municipio y así seleccionar la mejor opción de tratamiento de aguas residuales para este.

Se revisaron un gran número de artículos y libros que de igual manera funcionaron como guía y apoyo para el desarrollo del proyecto, siendo estos enlistados en los anexos.

11.3 Marco conceptual

A través del desarrollo de este proyecto de investigación se fueron acoplando una serie de conceptos con relevancia y que, de su adecuada comprensión, se sientan las bases para la satisfactoria ejecución de este.

- Aguas Crudas: Aguas residuales que no han sido tratadas. (Medina, 2012).
- Aguas Combinadas: Aguas compuestas por aguas residuales y aguas pluviales. (Minvivienda, 2017).
- Aguas Residuales Municipales: Residuos líquidos, generados por una comunidad. Posiblemente han sido formados por aguas residuales domésticas o descargas industriales. (Lenntech, 2019).
- Aguas Grises: efluentes domiciliarios provenientes de la cocina, duchas y lavaderos, que se disponen de manera separada a las aguas contenedoras de materia fecal. (Núñez, 2014).
- Alcantarillado: conjunto de tuberías y canales que conforman el sistema de evacuación de las aguas residuales, pluviales o combinadas de una comunidad, y al cual desembocan las acometidas del alcantarillado de los inmuebles. (Minvivienda, 2017).
- Alcantarillado Combinado: red de alcantarillado que transporta tanto aguas residuales como agua de lluvia de escorrentía. (Lenntech, 2019).
- Amenaza: Peligro latente asociado con la potencial ocurrencia de un evento de origen natural o antrópico que puede manifestarse en un sitio específico y en un tiempo determinado produciendo efectos adversos en un sistema. Se expresa matemáticamente como la probabilidad de ocurrencia de un evento de una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición definido. (Minvivienda, 2017).
- Biogás: Mezcla de gases, producto del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica o biodegradable de las basuras, cuyo componente principal es el metano. (RAS, 2017)

- Caracterización de las Aguas Residuales: Determinación de la cantidad y características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales. (Minvivienda, 2017)
- Carga superficial: Caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento ($m^3/(m^2 \cdot día)$, $kg\ DBO/(ha \cdot día)$). (Minvivienda, 2017)
- Carga orgánica: Producto de la concentración media de DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d). (Minvivienda, 2017).
- Caudal: Cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo. (Minvivienda, 2017)
- Caudal de diseño: Caudal estimado al final del periodo de diseño con el cual se diseñan los equipos, dispositivos y estructuras de un sistema determinado. (Minvivienda, 2017)
- Caudal Máximo Horario (QMD): Consumo máximo durante veinticuatro horas, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado. (Minvivienda, 2017)
- Cuerpo Receptor: Cualquier masa de agua natural o de suelo que recibe la descarga del afluente final. (Minvivienda, 2017)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20 °C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable. (Minvivienda, 2017)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas.
- Estado: Situación temporal actual de la totalidad de los puntos y la red investigada. (Minvivienda, 2017).
- Georreferenciar: Acción de ubicar uno o varios puntos a partir de un grupo de puntos semejantes previamente localizados. (ArcGIS Resources, s.f.)
- Línea Base: Análisis de la información técnica, científica, económica, social y ambiental disponibles e identificación de actores involucrados en la planificación de los recursos naturales, así como los principales conflictos y riesgos naturales y antrópicos no intencionales relacionados con los recursos naturales. (MADS, 2015)
- Sólidos suspendidos (SS). Partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución, y que no se consideran sólidos disueltos. (RAS, 2017)
- Sólidos totales (ST). Son sustancias contenidas en el agua que toman esta forma luego de la evaporación del agua a los 103 a 105 ° C. (RAS, 2017)
- Mantenimiento: Conjunto de acciones que se ejecutan en las instalaciones y/o equipos para prevenir daños o para la reparación de los mismos cuando se producen. (RAS, 2017)
- Modelo matemático: Modelo científico que emplea formulación matemática para la representación abstracta de los sistemas. (Minvivienda 2017).
- Monitoreo: Actividad consistente en efectuar observaciones, mediciones y evaluaciones continuas en un sitio y período determinados, con el objeto de identificar los impactos y riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública o para evaluar la efectividad de un sistema de control. (RAS,2017)
- Sólidos suspendidos (SS). Partículas sólidas orgánicas o inorgánicas que se mantienen en suspensión en una solución, y que no se consideran sólidos disueltos. (RAS, 2017)

- Sólidos totales (ST). Son sustancias contenidas en el agua que toman esta forma luego de la evaporación del agua a los 103 a 105 ° C. (RAS, 2017)

11.4 Marco teórico

11.4.1 Generación de Aguas Residuales y su importancia

La generación de vertimientos a los cuerpos hídricos es un proceso que resulta inevitable por cuenta del desarrollo y la acción humana, dependiendo las características de estos del contexto socioeconómico y cultural, lo que conlleva a que los procesos de tratamiento y el adecuado manejo del recurso estén ligados de manera directa a las características fisicoquímicas y biológicas del agua residual, así como el impacto que genera a los cuerpos hídricos receptores y a las comunidades existentes en un territorio (Romero, 2008). Es fundamental la caracterización de estas propiedades fisicoquímicas y biológicas ya que independientemente de las caracterizaciones típicas de las aguas residuales en función del tipo de uso del recurso que existen en la literatura, todas las aguas residuales presentan características únicas y de estas dependerá la importancia que se le debe dar a cada una en el proceso de tratamiento. Los caudales de aguas residuales pueden variar a lo largo del año, de los días y de las horas, se debe tomar en consideración dichas fluctuaciones para predecir variaciones en el nivel del caudal, que se traducen como el afluente que terminará llegando a la PTAR (Romero, 2008).

11.4.2 Fuentes de Generación y Puntos de Vertimiento

En el área de interés las principales fuentes generadoras corresponden a las aguas residuales provenientes de actividad agropecuaria y doméstica. En el desarrollo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de carácter Municipal se hace necesario comprender los procesos productivos de donde provienen los vertimientos, sus tipos, puntos de vertimiento y cuerpos receptores para establecer los métodos más eficientes en términos de eficiencia de remoción de contaminantes y las tecnologías más adecuadas para llevar este proceso de tratamiento a cabo. Igualmente, los aspectos sociales, territoriales, ambientales y normativos se deben articular con los esfuerzos para la selección de los procesos más afines económica, normativa y eficientemente hablando (Schoenberger, 2009).

11.4.3 Periodo de Diseño

Cualquier obra de la Ingeniería Civil (una de ella las PTAR), requiere establecer la cantidad de años que la misma va a satisfacer de manera eficiente el servicio para la cual fue diseñada. Existen algunos factores determinantes que se deben tener en cuenta a la hora de establecer este periodo (López, 1995):

- Vida útil de las estructuras y equipo tomados en cuenta obsolescencia, desgaste y daños.
- Ampliaciones futuras y planeación de las etapas de construcción del proyecto.
- Cambios en el desarrollo social y económico de la población.
- Comportamiento hidráulico de las obras cuando éstas no estén funcionando a su plena capacidad.

Los períodos típicos de diseño para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales oscilan de 20 a 25 años para poblaciones para se caracterizan por un crecimiento bajo (López, 1995).

11.4.4 Población de Diseño

Es fundamental establecer la cantidad de personas para la cual se proyecta que la Planta deberá suplir su necesidad de acceso a una fuente de agua con la calidad suficiente para hacer uso de la misma en sus actividades diarias, para lo cual es de gran importancia considerar las características socioeconómicas y culturales de los habitantes en la actualidad y posteriormente, además de realizar predicciones sobre su futuro desarrollo, así como tener en cuenta las poblaciones flotantes existentes y futuras y el desarrollo económico e industrial que experimentará el municipio. Para esto, existen varios métodos proyección de las poblaciones, los cuales se ajustan unos mejor que otros en función del tipo de población sus características propias. Los métodos utilizados para el cálculo son algunos sugeridos para el diseño de estructuras hidráulicas de este tipo, por el autor Ricardo Alfredo López en su libro “Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados”, 1995:

- Método aritmético
- Método exponencial
- Método geométrico
- Método de Wappaus

Ejecutados estos métodos, se debe elegir una Población de Diseño, por medio del descarte de los métodos que no proporcionen una población acorde a las condiciones de crecimiento que presenta el municipio.

11.4.5 Tasa de Crecimiento Poblacional

El cambio anual en términos de porcentaje en una población. Está tasa es un importante factor a tener en cuenta a la hora de entender el desarrollo demográfico que poseerá la población objetivo a futuro, implicando por consiguiente un cambio en las necesidades, servicios, infraestructura y uso de los recursos. Permite conocer el aumento poblacional año a año y, por tanto, con base a esto, estimar las cargas contaminantes futuras que se verterán en los cuerpos superficiales. (APHEO, s.f).

11.4.6 Modelación Matemática del Oxígeno Disuelto (OD)

El modelo planteado por Streeter y Phelps por primera vez en el año 1925, por medio del estudio del río Ohio en EE. UU., permitió modelar el cambio en términos de miligramos de oxígeno por litro en el Oxígeno Disuelto (OD) perteneciente a un cauce el cual ha recibido una descarga de agua residual. Este modelo inicial ha sido modificado para la modelación a partir de fuentes de descarga puntuales a los cuerpos superficiales (Chapra, 2008). El estudio del cambio del Oxígeno Disuelto (OD) a lo largo de los principales afluentes que reciben las mayores descargas, priorizadas en el PSMV de Pacho del año 2017, es fundamental para conocer el grado de degradación de los cuerpos hídricos consecuencia del aporte de las cargas contaminantes, lo cual se establece como un diagnóstico para determinar si la realización de la PTAR es realmente necesaria, por medio de la comparación de los niveles de Oxígeno Disuelto (OD) y de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) obtenidos, con los niveles establecidos en los objetivos de calidad Clase II de la Cuenca del Río Negro hasta el año 2020 (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017). La modelación de los afluentes es indispensable para el cálculo del Caudal de Diseño de la Planta e importante para la determinación del Sistema de Tratamiento más adecuado.

11.4.7 Ubicación de la una Planta de tratamiento de aguas residuales

Las PTAR deben estar ubicadas en zonas distantes de ecosistemas críticos, así como de zonas recreativas, el terreno debe ser geológicamente estable y libre de amenazas de deslizamientos, inundaciones. También se recomienda que donde se ubiquen, los vientos no se desplacen de manera regular hacia donde se encuentra la población, se establece a más de 1km de la población, aunque esta distancia se puede reducir hasta 200 m si un estudio de impacto determina que no es significativo el mismo para los pobladores (Min. Desarrollo Económico, 2000).

11.4.8 Composición de las aguas residuales

La composición de las aguas residuales crudas que afectan a los afluentes de un territorio es una de las variables fundamentales para la selección de una PTAR, donde se debe tener en cuenta las concentraciones de los parámetros de calidad del agua criterio para su clasificación (fuerte, media, débil/ligera). De ello depende el grado de tratamiento, así como la tecnología a utilizar y la eficiencia requerida para alcanzar el cumplimiento normativo. (Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015).

11.4.9 Calidad requerida en el efluente de la Planta

Con base a la composición de las aguas residuales y la normativa ambiental vigente, la alternativa de tratamiento debe cumplir con los requerimientos de eficiencia necesarios para descargar un efluente con los parámetros en términos de calidad hídrica suficientes para un uso seguro en las actividades establecidas con anterioridad por parte de la comunidad aledaña. Cada país tiene normas distintas para el vertimiento a cuerpos de agua receptores, por lo que una comparación entre los valores máximos permisibles de estas favorece para la selección de las tecnologías de tratamiento más adecuadas para los diferentes contextos que pueden llegar a presentarse a la hora de hacer un estudio acerca de las necesidades de una población. (Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015).

11.4.10 Selección de una PTAR

Para la selección de una PTAR se deben considerar atributos significativos de evaluación que tomen en cuenta la operación y mantenimiento de la planta, basándose en la bibliografía de (Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015). Se consideran: atributo técnico, económico y ambiental. Para el atributo técnico se consideran aspectos tales como la normativa vigente para vertimiento en los cuerpos de agua receptores y las eficiencias en la remoción de contaminantes. Necesario escoger parámetros tales como la confiabilidad, ingreso de cargas orgánicas y de concentración de contaminantes, viabilidad del diseño, y facilidad de operación. En el atributo económico se consideran los costos de inversión, operación y mantenimiento de la planta, donde siempre prima obtener el agua tratada óptima al menor costo posible (Rojas, 2002). Se considera también el requerimiento de área de implementación y de expansión, demandas energéticas y requerimiento de personal calificado. Para el atributo ambiental se consideran los efectos al entorno que puede causar la instalación de la planta, descritos en parámetros tales como: generación de olores, ruido, espumas, impacto estético, reutilización del agua residual tratada y estabilidad de la PTAR.

El municipio de Pacho se encuentra localizado al Noroccidente del Departamento de Cundinamarca y es cabecera de la Provincia del Rionegro, de la cual hacen parte también los Municipios de La Palma, Yacopí, El Peñón, Paime, Topaipí, Villagómez y San Cayetano. Limita por el Norte con los Municipios de San Cayetano, Villagómez y Topaipí; por el Sur con los Municipios de Supatá y Subachoque; al Occidente con los Municipios de Vergara y el Peñón; y por el Oriente, con los Municipios de Zipaquirá, Tausa y Cogua.

Posee un área jurisdiccional municipal de aproximadamente 40.340.25 Has, de las cuales a la cabecera municipal le corresponden 360.8 hectáreas. Posee un rango altitudinal comprendido entre los 1.000 y los 3.700 m, estando la cabecera municipal a una altitud de 2136 msnm (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017), la zona rural está conformada por 72 veredas. En el municipio, las principales actividades productivas corresponden a actividades ganaderas, de agricultura, mineras y principalmente domiciliarias, además, presenta un crecimiento demográfico acelerado, con un incremento de más de 5000 habitantes entre 2005 y 2015 (Concejo municipal de Pacho, 2016).

La hidrografía del perímetro urbano se ubica en la subcuenca río alto Negro de la cuenca río Negro, la cual cobra importancia ya que en esta se localizan los cuerpos receptores de los vertimientos que han sido identificados, siendo estos los ríos Rute / San Antonio y Batán, y las quebradas el Tao, la Coca, Celián, La Soledad / Leones, Copetones y Gotaque.

El municipio se encuentra en la cuenca alta del río Negro. Esta tiene una forma ovalada que se identifica con el coeficiente de Gravelius, el cual tiene un valor de 1.37 lo que efectivamente indica una forma ovalada para la cuenca (PBOT, 2000)

Con respecto al clima, Pacho tiene una temperatura media de 22.9 grados Celsius con un máximo de 27.6 grados Celsius, siendo un clima generalmente cálido y templado. Las lluvias en Pacho se concentran en el mes de abril, teniendo sus picos más altos en los meses de abril y octubre y sus temporadas más secas en el mes de julio y enero. Se cuenta con una precipitación media anual de 1670 mm aproximadamente y 116.9 mm de media mensual (Concejo municipal de Pacho, 2016) (PBOT, 2000)

El municipio tiene una pendiente media de 36.19% lo que se considera alto lo que ocasiona que el poder de arrastre sea considerable según el PBOT 2000, también hace presencia en el municipio los bosques muy húmedo montano bajo y bosque muy húmedo premontano (PBOT, 2000)

Se tienen identificadas zonas de alta susceptibilidad a los riesgos y amenazas por deslizamiento y zonas propensas a inundaciones debido al alta pendiente anteriormente mencionada y el tipo de suelos que se presentan en el municipio, como lo son los tipos de suelo llamados Asociación Esmeralda, Minipi y Guaduas, Santa Inés, Hacienda, Pilitas, entre otros (PBOT, 2000)

El municipio no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales en su territorio municipal, teniendo en cuenta sus condiciones previamente mencionadas, entendiendo estas como el contexto en el que se desarrolló el proyecto, fue analizado este contexto para dar con la mejor solución posible para la problemática de estudio.

11.6 Marco institucional

En el municipio de Pacho, se encuentra con jurisdicción la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), la cual emitió la Resolución 3461 de 2009 que dicta los objetivos en calidad del agua para la cuenca del río Negro al año 2020, así mismo ejerce el control y monitoreo de lo concerniente con el recurso hídrico en este caso.

La alcaldía municipal de Pacho, la cual es la organización administrativa encargada de aprobar y disponer los recursos para la ejecución de proyectos dentro de su jurisdicción, así como proveer información de relevancia para la realización de estudios requeridos tal como el número de usuarios de servicios públicos, población, usos del suelo, generalidades del territorio etc.

En el municipio está presente Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC), específicamente también conocido como Empresa de Servicios del Municipio de Pacho S.A E.S.P, este presta los servicios de alcantarillado público y por consiguiente debe presentar un Plan de Manejo y Saneamiento de los Vertimientos (PSMV) a su alcantarillado y a cuerpos receptores aledaños al municipio, por lo que este deberá dar cumplimiento a la resolución dictada por la CAR en la cuenca del río Negro donde se encuentra el municipio.

Como afirman la EPC y la CAR en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) actualizado a fecha de 2017, donde se consolidan los 27 puntos de vertimiento identificados, se debe tener un nivel de tratamiento el cual cumpla con la normatividad ambiental vigente aplicable (Resolución 631 de 2015 y Resolución 3461 de 2009) debido a que se están realizando vertimientos directos a los cuerpos de agua receptores sin tratamiento previo en la actualidad.

Como último elemento, la Universidad El Bosque, a la cual se le adjudica la autoría intelectual de este trabajo de grado y por ello este documento podrá almacenarse en su repositorio, la biblioteca Juan Roa Vásquez.

11.7 Marco normativo

En este capítulo se recopiló la normatividad que aplica al proyecto y que aporta un marco a tomar en cuenta para el satisfactorio desarrollo del mismo.

Ley 23 de 1973, que tiene como objeto prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente, y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional.

Decreto Ley 2811 del 18 diciembre de 1974, por medio de la cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Ley 99 de 1993, a través de la cual es creado el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental - SINA- y se dictan otras disposiciones.

En la normativa Colombiana se cuenta con la Resolución 1433 de 2004 que reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre planes de saneamiento y tratamiento de vertimientos, PSMV entre otras determinaciones. En la Resolución 1433, en su artículo 1o. se dan las directrices acerca del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), en este plan debe contemplarse el tratamiento de aguas residuales y su disposición final descargadas al sistema público y por último a los cuerpos de agua receptores. Este plan debe ser aprobado por la entidad ambiental competente y deberá ser elaborado con información acerca de la calidad y usos de los cuerpos de agua receptores, así como la información de los vertimientos puntuales e información de la población.

La Resolución 2115 de 2007 por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para el consumo humano da los máximos valores permisibles en un cuerpo de agua para que sea considerado apto para consumo humano y dicta sustancias comunes para la potabilización del recurso hídrico.

Teniendo los anteriores en cuenta, se expide la Resolución 3461 de 2009 en la cual establece los objetivos de calidad del agua para la cuenca del Río Negro a lograr en el año 2020 por la CAR, esta Resolución abarca diferentes parámetros que determinan la calidad del recurso hídrico como DBO, SST, OD, C. TOTALES, E. COLI, N-AMONIACAL, FÓSFORO TOTAL, NITRATOS, NITRITOS y esto es tenido en cuenta en el PSMV realizado por el alcantarillado público del casco urbano, municipio de Pacho, Cundinamarca. En este plan se identifican 8 cuerpos de agua receptores de vertimientos directos y 28 puntos de vertimientos puntuales a estos mismos, establece el plan a seguir con respecto al alcantarillado y a la posible ubicación de una PTAR en el municipio, así como su presupuesto para la construcción y puesta en funcionamiento.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010-2022) del MADS, donde se establece el estado actual de este recurso en el país, asimismo, es el instrumento que direcciona la Gestión Integral del Recurso Hídrico, estableciendo los objetivos y estrategias para el uso y aprovechamiento eficiente del agua, los objetivos para la prevención de la contaminación del agua, tomando este recurso natural como factor de desarrollo económico y de bienestar social. Este proyecto de investigación se ve directamente relacionado con los objetivos 1, 3 y 4 de la política, estableciendo estos:

- Objetivo 1. OFERTA: Conservar los ecosistemas y los procesos hidrológicos de los que depende la oferta de agua para el país.
- Objetivo 3. CALIDAD: Mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico.
- Objetivo 4. RIESGO: Desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua.

El Decreto 3930 de 2010 el cual reglamenta parcialmente el título 1 de la Ley 9na de 1979 así como el capítulo 2 del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y a residuos líquidos entre otras disposiciones, aplica a las autoridades ambientales competentes, a los generadores de vertimiento y a los prestadores del servicio público de alcantarillado. El prestador del servicio de alcantarillado está en la obligación de dar cumplimiento a la norma 1433 de 2004 y contar con Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) y dicta disposiciones para el permiso y manejo de los vertimientos, además habla acerca del plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos donde promueve la conversión tecnológica a los procesos productivos de los generadores de vertimiento que desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios.

La Resolución 631 de 2015, la cual establece los parámetros y los valores límite máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Resolución 330 de 2017 en la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) en el cual se reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de infraestructura relacionada con los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo (Minvivienda, 2017). Esta resolución aportó una guía para cada una de las etapas en las que se desarrolló el proyecto como se enlistaron anteriormente.

12 Marco metodológico

12.1 Enfoque

El desarrollo de la investigación fue efectuado a través de un enfoque cuantitativo, debido a los procesos sistemáticos y críticos aplicables al fenómeno objeto de estudio. Esta afirmación es sustentada con base a Sampieri, Collado, & Lucio, 2014, en su libro “*Metodología de la investigación. Sexta Edición McGraw-Hill*” donde los autores exponen las características que posee el enfoque cuantitativo de investigación: siendo este de tipo secuencial y probatorio, donde cada etapa depende de su antecesora para su desarrollo, nace a partir de una idea que va delimitándose hasta establecerse un alcance definido, a partir de ello son redactados los objetivos y la pregunta de investigación y derivado de lo anterior las hipótesis, las cuales son probadas gracias al diseño que es ejecutado, con la necesidad de medición de variables y las mediciones con las que se cuenta son analizadas por medio de métodos estadísticos. Tomando en cuenta el proceso desarrollado, son determinadas las conclusiones. Este enfoque se diferencia con el cualitativo ya que este último busca la “dispersión o expansión” de los datos e información, mientras que el cuantitativo por su parte, pretende “acortar” la información (medir con alta precisión), también, el enfoque cuantitativo sienta sus bases primordialmente en antecedentes (investigaciones previas) y por su parte el estudio cualitativo se fundamenta, en general, por sí mismo. (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014)

Las fases que integra un enfoque cuantitativo en una investigación son sintetizadas de manera más sencilla por medio de un esquema que ilustra el proceso cuantitativo, como es observable en la figura de a continuación.

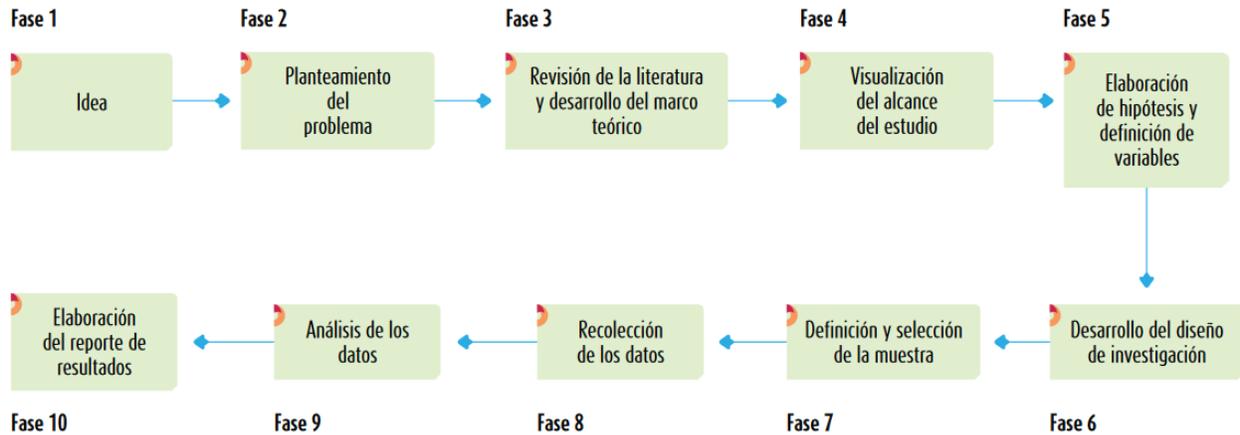


Figura 3. Proceso Cuantitativo
Fuente: Sampieri, Collado, & Lucio, 2014

12.2 Alcance

Este estudio posee un alcance correlacional, debido a que son asociadas variables como la del uso del suelo, las actividades predominantes de los pobladores y el crecimiento demográfico con el aporte per cápita de DBO5, SST y OD en las descargas a cuerpos naturales, así como la representatividad de lo anterior para establecer el grado de degradación del recurso hídrico en años futuros, por lo que esto permite predicciones acerca de los impactos en afluentes de Pacho. También, fueron cuantificadas relaciones entre conceptos y variables para conocer concentraciones actuales y futuras de contaminantes vertidos, población de diseño, tasa de crecimiento poblacional o la eficiencia requerida para las tecnologías de tratamiento.

12.3 Metodología primer objetivo

Según el objetivo general que fue planteado, la investigación que toma curso para este proyecto es de tipo descriptiva y experimental, ya que se busca conocer, medir y analizar cómo el fenómeno en cuestión se presenta. Además, este tipo de estudios se caracteriza por especificar las características de las comunidades, siendo en este caso un estudio en el cual se busca conocer, analizar y remediar con un fenómeno determinado (afectación a la calidad hídrica por cuenta de vertimientos de aguas residuales) en una comunidad (municipio de Pacho).

Fue realizada una recolección de trabajos de grado y libros pertinentes al tema de tratamiento de aguas residuales, a partir de esta recolección se obtuvo una base sólida poner en marcha el proyecto, y a través de la información encontrada, llegar a proponer el sistema de tratamiento que se adecue a las condiciones presentes en el municipio de Pacho, Cundinamarca.

Cada una de las fases se alimentó de su antecesora para el cumplimiento de este objetivo, inicialmente fue llevada a cabo una identificación de la zona de estudio, principales actividades económicas y sus problemáticas, seguido a esto fue desarrollada una línea base del estado del alcantarillado en la cabecera municipal, en la cual fue de especial relevancia los seis puntos de descarga de vertimientos priorizados por el PSMV de Pacho, 2017 y de esta forma contar con una visión más clara acerca del estado actual de

las redes de alcantarillado, así como identificar los cuerpos superficiales que se ven más afectados consecuencia de la existencia de vertimientos a sus aguas.

Para establecer una identificación de la zona de estudio y posteriormente una línea base del estado del municipio, fue obtenida una base de datos de documentos relevantes del municipio de Pacho, Cundinamarca, con validez literaria. Estos documentos dotan al proyecto de información secundaria relevante, dentro de estos documentos se encuentran el PBOT de Pacho con última fecha de actualización de 2000, los informes técnicos PSMV presentados por la empresa prestadora del servicio de alcantarillado con fechas 2017 y 2018 como datos técnicos más recientes, el documento del Plan de Desarrollo Municipal presentado con fecha de vigencia 2016-2019, el plan maestro a partir del año 2014 donde fueron evidenciados los proyectos que se han adelantado en el municipio con respecto a vertimientos y alcantarillado.

Estos documentos están disponibles al público en la página oficial del municipio, sin embargo, se consultó el expediente número 48763 de la CAR donde se evidencian los documentos presentados por parte de la empresa prestadora del servicio de alcantarillado y anexos relevantes para el proyecto.

Una de las variables consideradas fue la población futura y para esto, se hizo necesario evaluar la tasa de crecimiento demográfico del municipio, lo que proporcionó información para identificar el nivel de complejidad de este, así como el tiempo de diseño para la planta de tratamiento. Se tomaron en cuenta los parámetros de calidad del agua criterio (DBO y SST) de los vertimientos priorizados por el PSMV del año 2017, con el fin de determinar a partir de estos en los dos objetivos posteriores qué sistema de tratamiento es el más adecuado para el contexto territorial (casco urbano) además de evaluar el nivel de cumplimiento de la norma que aplica acerca de vertimientos puntuales (Resolución 631 de 2015). Así mismo, los datos de caracterización de los cuerpos de agua suministrados en este documento técnico sirvieron de insumo para las simulaciones de evaluación de impacto sobre los principales afluentes (río Rute y Batán) producto de los vertimientos, mediante el modelo Streeter-Phelps.

Se realizó una visita técnica donde se planeó, además de observar, obtener datos fotográficos y espaciales de los puntos de vertimientos priorizados por el municipio, con el fin de dar veracidad a la información y obtener insumos para el posterior procesamiento de estos y así generar mapas haciendo uso del Sistema de Información Geográfica ArcGIS, en los cuales sean espacializados los puntos de vertimiento y así dar una visión ilustrativa de los cuerpos de agua que sufren mayor impacto y su ubicación en el territorio. Efectuado lo anterior se acudió a una entrevista con funcionarios de la empresa prestadora de servicio Aguas Pacho E.S.P. y de la Alcaldía Municipal, con el objeto de obtener información adicional y un concepto acerca del proyecto de las personas que conocen la realidad de Pacho mucho más de cerca que de lo que se puede interpretar en cualquier fuente bibliográfica. Con base en la información obtenida en terreno y su procesamiento, se hizo posible valerse de una sólida línea base con la que se analizó el estado del perímetro urbano en términos de alcantarillado y cuerpos receptores, entendiéndose estos como los recolectores de las aguas residuales crudas que actualmente generan degradación al recurso hídrico en Pacho.

Estas actividades se llevaron a cabo con base en documentación acerca de otros estudios de diseños de plantas de tratamiento en países en vía de desarrollo y otros documentos científicos como el de “Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales” del autor William Antonio Lozano 2012 de la Universidad Piloto de Colombia, se adaptó la metodología del capítulo 1 “Datos de partida”

donde se indica que el inicio de un diseño de una planta de tratamiento parte de una caracterización de la línea base del sitio a evaluar, esto seguido de cada uno de los posibles sistemas a implementar.

Con el fin de tener un soporte de la visita técnica, se estableció un formato de registro de campo, donde se consolidaron las características referentes a: punto de muestreo, coordenadas identificadas mediante GPS, nombre del área al que pertenece el vertimiento, registro fotográfico del punto y descripción acerca de lo que se evidenció en la visita técnica con respecto a la zona y al punto mismo.

En el desarrollo del primer objetivo, la técnica fue el análisis de información recolectada, tanto de forma presencial como digital, para sentar la línea base, mientras que los instrumentos fueron de los cuales se hizo uso para el procesamiento de esta información tal como las bases de datos consultadas, la metodología a seguir utilizada, el Sistema de Información Geográfica ArcGIS, las cámaras de registro fotográfico, la matriz de registro de visita técnica y por último el GPS para la toma de coordenadas en cada punto de vertimiento priorizado.

12.4 Metodología segundo objetivo

El tiempo de diseño de la planta de tratamiento está directamente relacionada con el nivel de complejidad que a su vez se relaciona con la población, el nivel económico y la altitud del municipio, para determinar este nivel de complejidad y a partir de este, el tiempo de diseño, se indagó en la documentación consultada, como el Plan de Desarrollo (2016 - 2019), PBOT 2000 y censos poblacionales oficiales en los cuales se presenta la población actual del municipio. A partir de la obtención del nivel de complejidad y el tiempo de diseño, fue realizada la proyección poblacional. Según el RAS 2000, la clasificación para el nivel de complejidad es la siguiente.

Nivel de complejidad	Población	Capacidad económica
Bajo	< 2500	Baja
Medio	2051 - 12500	Media
Medio Alto	12501 a 60000	Media
Alto	>6001	Alta

Tabla 1. Clasificación de complejidad por población
Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000

El periodo de diseño es obtenido de la siguiente en manera con base al nivel de complejidad, según el RAS 2000

Nivel de complejidad	Periodo de diseño
Bajo	15 Años
Medio	20 Años
Medio Alto	25 Años
Alto	30 Años

Tabla 2. Periodo de diseño de una PTAR según nivel de complejidad
Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000

Según este nivel de complejidad se deben emplear los métodos de proyección aplicables según el RAS, 2000. – Tabla B.2.1

Método a emplear	Nivel de complejidad del sistema			
	Bajo	Medio	Medio Alto	Alto
Aritmético, Geométrico, y exponencial	X	X		
Aritmético + Geométrico + Exponencial + Otros			X	X
Por componentes (demográfico)			X	X
Detallar por zonas y detallar densidades			X	X

Tabla 3. Métodos de proyección validos según nivel de complejidad
Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000

12.4.1 Proyección de población

Con el fin de determinar la población proyectada con base a la población actual en el municipio, considerando tanto población de la cabecera municipal como su población flotante, se utilizaron los censos de los años 1951 (primer censo), 2017 y 2019 como insumo para los métodos de proyección aritmético, método de Wappaus, método geométrico y método exponencial.

Método de Proyección	Formula	Descripciones
Aritmético	$P_f = P_{uc} + \left(\frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \right) * (T_f - T_{uc})$	P_f = Población final P_{uc} = Población Último Censo P_{ci} = Población Censo inicial T_f = Año al cual se busca proyectar la población T_{ci} = Año censo inicial T_{uc} = Año ultimo censo
Exponencial	$P_f = P_{ci} * e^{k(T_f - T_{ci})}$	P_f = Población final P_{ci} = Población Censo inicial k = Tasa de crecimiento de la población T_f = Año al cual se busca proyectar la población T_{ci} = Año censo inicial P_{cp} = Poblacion Censo posterior P_{ca} = Poblacion Censo anterior T_{cp} = Año censo posterior T_{ca} = Año censo anterior
	$k = \frac{\ln(P_{cp}) - \ln(P_{ca})}{T_{cp} - T_{ca}}$	
Geométrico	$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$	P_f = Población final P_{uc} = Población Último Censo r = Tasa de crecimiento población anual T_f = Año al cual se busca proyectar la población T_{uc} = Año ultimo censo T_{ci} = Año censo inicial P_{ci} = Población Censo inicial
	$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{T_{uc} - T_{ci}}}$	
Wappaus	$P_f = P_{ci} * \left(\frac{200 + i(T_f - T_{ci})}{200 - i(T_f - T_{ci})} \right)$	P_f = Población final P_{ci} = Población Censo inicial T_f = Año al cual se busca proyectar la población T_{ci} = Año censo inicial P_{uc} = Población Último Censo Se verifica si "i" cumple con la condición $I * (T_f - T_{ci}) < 200$.
	$i = \left(\frac{200 * (P_{uc} - P_{ci})}{(T_{uc} - T_{ci}) * (P_{uc} + P_{ci})} \right)$	

Tabla 4. Métodos de proyección
Fuente: Autores en base a López, 1995

Para determinar que método y resultado es el correcto se realizó un descarte de resultados mediante un promedio y un umbral del 10% en donde el resultado que se encuentra fuera de este umbral es descartado.

12.4.2 Determinación de demanda y generación de aguas residuales

Para determinar las concentraciones de DBO5 y SST a tratar por la planta, es necesario conocer la dotación neta requerida por habitante en el municipio y cantidad de generación de aguas residuales, conociéndose como caudal de aguas residuales domésticas, comerciales, instituciones e industriales.

Con el fin de conocer la dotación en el municipio según el RAS 2017, Título B, se encuentra la siguiente clasificación según altura sobre nivel del mar en la que se encuentra el municipio.

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima $\frac{L}{hab*día}$
>2000 m.s.n.m	120
1000 – 2000 m.s.n.m	130
<1000 m.s.n.m	140

Tabla 5. Dotación neta máxima según altura sobre nivel del mar.

Fuente: Minvivienda, 2017

Así mismo para encontrar el caudal de agua residual doméstica se aplicó la siguiente ecuación del título D del RAS 2017.

$$Q_D = \frac{\text{Coeficiente de retorno} * \# \text{ Habitantes} * \text{Dotación Neta}}{86400}$$

Ecuación 1. Caudal de agua residual domestica

Fuente: Minvivienda, 2017

Se utiliza el coeficiente de retorno sugerido por el RAS, según el nivel de complejidad.

Nivel de complejidad del sistema	Coeficiente de retorno
Bajo y medio	0.7 - 0.8
Medio alto y alto	0.8 - 0.85

Tabla 6. Coeficiente de retorno según nivel de complejidad

Fuente: Minvivienda, 2017

Para el caudal de agua residual de tipo comercial el RAS en su título B numeral 2.5.3.1, propone los siguientes consumos de agua.

Tipo de instalación	Consumo de agua
Oficinas	$20 \frac{L}{m^2 * d}$
Locales comerciales	$6 \frac{L}{m^2 * d}$
Mercados	$100 \frac{L}{Local * d}$
Lavanderías de autoservicio	$40 \frac{L}{Kilo ropa seca}$
Chubs deportivos y servicios privados	$150 \frac{L}{Asistentes * d}$
Cines y teatros	$6 \frac{L}{Asistentes * d}$

*Tabla 7. Consumo de agua para el sector comercial
Fuente: Minvivienda, 2017*

El caudal de aguas residuales de tipo institucional se divide en escolar, sector salud y seguridad y hotelería.

Para caudal escolar se encuentra en el RAS la siguiente tabla.

Tipo de instalación	Consumo de agua
Educación elemental	$20 \frac{L}{Alumno * Jornada}$
Educación media y superior	$6 \frac{L}{Alumno * Jornada}$

*Tabla 8. Consumo de agua sector institucional
Fuente: Minvivienda, 2017*

Para el sector Salud y Seguridad se presentan los siguientes consumos.

Tipo de instalación		Consumo de agua
Salud	Hospitales, clínicas y centros de salud	$800 \frac{L}{Cama*d}$
	Orfanatos y asilos	$300 \frac{L}{Huesped*d}$
Seguridad	Cuarteles	$150 \frac{L}{Persona*d}$
	Cárceles	$150 \frac{L}{Interno*d}$

Tabla 9. Consumo de agua sector salud y seguridad
Fuente: Minvivienda, 2017

Para el sector de Hotelería se presenta los siguientes consumos.

Clasificación	Consumo en hoteles $\frac{L}{Cuarto*d}$			
	Municipios turísticos		Otros municipios	
	Clima templado y frío	Clima cálido	Clima templado y frío	Clima cálido
Gran turismo	1200	2000	600	1000
4 y 5 estrellas	900	1500	450	750
1 a 3 estrellas	600	1000	300	400

Tabla 10. Consumo de agua sector hotelero
Fuente: Minvivienda, 2017

Por último, el caudal industrial se tuvo en cuenta siguiendo las siguientes tablas.

Tipo de instalación	Consumo de agua $\frac{L}{Trabajador*Jornada}$
Industrias donde se manipulen sustancias que ocasionen desaseo	100
Otras industrias	30

Tabla 11. Consumo de agua sector industrial
Fuente: Minvivienda, 2017

Consumo industrial	
Industria	Rango de consumo $\frac{m^3}{d}$
Azucareria	4.5 - 6.5
Química	5.0 - 25
Papel y Celulosa	40 - 70
Bebidas	6.0 - 17.0
Textil	62 - 97
Siderúrgica	5.0 - 9.0
Alimentos	4.5 - 5.0

Tabla 12. Rango de consumo distintas industrias.
Fuente: Minvivienda, 2017

Para finalizar, se determinó el caudal medio y el caudal máximo horario, así como el caudal de conexiones erradas y caudal por infiltración para poder determinar el caudal de diseño siguiendo lo dispuesto en el título D del RAS.

Concepto	Formula	Descripción
Caudal medio diario	$Q_{MD} = Q_D + Q_C + Q_{in} + Q_I$	Q_{MD} = Caudal medio diario Q_D = Caudal Domestico Q_C = Caudal Comercial Q_{in} = Caudal Institucional Q_I = Caudal Industrial
Caudal máximo horario	$F = \frac{3.114}{Q_{MD}^{0.062}}$	F = Factor de mayoración Q_{MD} = Caudal medio diario de aguas residuales
	$Q_{MH} = F * Q_{MD}$	Q_{MH} = Caudal medio horario F = Factor de mayoración Q_{MD} = Caudal medio diario
Caudal de conexiones erradas	$Q_{CE} = Area * Aporte$	$Area$ = Area del casco urbano $Aporte$ = Aporte de caudal por conexiones erradas
Caudal por infiltración	$Q_{INF} = Area * Infiltración$	$Area$ = Area del casco urbano $Infiltración$ = Capacidad de infiltracion media
Caudal de diseño	$Q_D = Q_{MH} + Q_{CE} + Q_{INF}$	Q_D = Caudal de diseño Q_{MH} = Caudal medio horario Q_{CE} = Caudal conexiones erradas Q_{INF} = Caudal de infiltraciones
Unidades	Caudales en $\frac{L}{s}$	Áreas en Ha

Tabla 13. Ecuaciones de medición de caudales
Fuente: Autores con base a Minvivienda, 2017

12.4.3 Simulación DBO5 y OD

Se evaluó el impacto que tienen los vertimientos directos de aguas residuales crudas a los cuerpos hídricos principales, los ríos Rute y Batán, para lo cual fue necesario recurrir al modelo de simulación Streeter-Phelps para fuentes puntuales, este modelo enlaza el oxígeno disuelto (OD) en una corriente con dos mecanismos que tienen influencia en él: la descomposición de la materia orgánica y la reaireación. Para esta metodología se basó en el libro “Surface Water-Quality Modeling” del autor Chapra C, Steven, 2008, donde se aporta, un modelo para analizar cuerpos de agua superficiales.

Para realizar el modelo se tuvo en cuenta el decaimiento del oxígeno, este fenómeno se da cuando el cuerpo de agua recibe una descarga de DBO5 en la concentración suficiente para influir en el oxígeno disuelto presente en ese punto, sin embargo, se encuentra una zona de reaireación donde el cuerpo de agua afectado tiene capacidad de depuración de cargas contaminantes, retornando a su concentración de oxígeno disuelto original, esto hipotéticamente ya que en realidad este fenómeno se ve influenciado por la tasa de remoción, tasa de descomposición y tasa de sedimentación. Estas tasas se conocen como tasas de decaimiento y se representan como se muestra en la siguiente ecuación.

Concepto	Formula	Descripción
Tasa total de remoción	$k_r = k_d + k_s$	$k_s =$ Tasa de sedimentación $k_d =$ Tasa de descomposición
Tasa de descomposición	$k_d = 0.3 \left(\frac{H}{2.4} \right)^{-0.434}$	$H =$ Profundidad lamina de agua m

Tabla 14. Tasa total de remoción y tasa de descomposición.

Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Con el fin de determinar cómo el cuerpo de agua se ve afectado por la descarga del vertimiento y así evaluar el modelo de Streeter-Phelps, se realizó un balance de masas tanto para la DBO como para el oxígeno disuelto una vez realizado el vertimiento, para esto es necesario tener la caracterización de cada uno de los vertimientos a evaluar y además el estado en el que viene el río en términos de concentración de DBO y OD antes de los vertimientos como se observa en la siguiente ecuación.

Concepto	Formula	Descripción
Concentración DBO5 $\frac{mg}{L}$	$L_0 = \frac{Q_{descarga} * L_{descarga} + Q_{rio} * L_{rio}}{Q_{descarga} + Q_{rio}}$	$Q_{descarga} =$ Caudal de vertimiento $\frac{m^3}{s}$ $L_{descarga} =$ Concentración DBO5 vertimiento $\frac{mg}{L}$ $Q_{rio} =$ Caudal del río $\frac{m^3}{s}$ $L_{rio} =$ Concentración DBO5 río $\frac{mg}{L}$

Tabla 15. Balance de masas/Concentración DBO5.

Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Concepto	Formula	Descripción
Concentración DBO5 en punto determinado $\frac{mg}{L}$	$L = L_0 e^{-\frac{k_r}{U}x}$	$L_0 =$ Concentración DBO5 de referencia $\frac{mg}{L}$ $K_r =$ Tasa total de remoción $U =$ Velocidad del agua $\frac{m}{s}$ $x =$ Distancia al punto m

Tabla 16. Determinación de DBO5 en una distancia determinada.
Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Para encontrar la evolución del déficit del oxígeno se empleó el modelo matemático que incluye las tasas de decaimiento previamente descritas como se muestra en la siguiente tabla, así como la concentración con la que viene el cuerpo de agua previamente al vertimiento.

Concepto	Formula	Descripción
Deficit de oxígeno $\frac{mg}{L}$	$D_c = \frac{k_d L_0}{k_a} \left[\frac{k_a}{k_r} \left(1 - \frac{(k_a - k_r) D_0}{k_d L_0} \right) \right]^{\frac{k_r}{k_a - k_r}}$	$K_d =$ Tasa de descomposición $L_0 =$ Concentración DBO5 de referencia $\frac{mg}{L}$ $K_a =$ Tasa de reareación $K_r =$ Tasa total de remoción $D_0 =$ Concentración Oxígeno $\frac{mg}{L}$

Tabla 17. Déficit de oxígeno.
Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Con el fin de encontrar el Oxígeno de Saturación se empleó la siguiente ecuación que está en función de la temperatura del agua.

Concepto	Formula	Descripción
Oxígeno de saturación $\frac{mg}{L}$	$\ln(C_s) = -139.34410 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T^2} + \frac{1.2438 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T^4}$	$T =$ Temperatura °C

Tabla 18. Oxígeno de saturación
Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Finalmente, con base a este modelo fue evaluado el oxígeno disuelto existente, donde se incluye el oxígeno presente y el oxígeno de saturación. Este se obtuvo a partir de la resta del oxígeno de saturación y el déficit de oxígeno presente en el cuerpo de agua, como se muestra en la siguiente ecuación.

Concepto	Formula	Descripción
Oxígeno disuelto $\frac{mg}{L}$	$OD_c = O_s - D_c$	$O_s = \text{Oxígeno de saturación } \frac{mg}{L}$ $D_c = \text{Deficit de Oxígeno } \frac{mg}{L}$

Tabla 19. Oxígeno disuelto.

Fuente: Autores con base a Chapra, 2008

Teniendo en cuenta el modelo Streeter-Phelps las gráficas que se obtuvieron una vez desarrollado el modelo matemático, son una representación gráfica del impacto que tienen los vertimientos existentes en los cuerpos receptores.

12.4.4 Proyección de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Fueron proyectadas las cargas de DBO y SST a futuro a partir de las actuales, consolidadas en el PSMV del casco urbano de Pacho, a manera de clarificar el aumento en los impactos a los cuerpos hídricos consecuencia de vertimientos, los cuales se intensificarán a futuro consecuencia del crecimiento demográfico. Para llevar esto a cabo y con base en las proyecciones poblacionales a la actualidad, así como los Aportes Per Cápita de DBO y SST sugeridos en el RAS, 2017, las proyecciones fueron efectuadas por para los tres quinquenios futuros (2024, 2029 y 2034). Consecuentemente, fueron proyectadas estas cargas igualmente al tiempo de diseño (año 2044), así como obtenidas las concentraciones proyectadas en mg/L de DBO y SST y de esta manera contar con una carga a depurar de partida, teniendo en cuenta los aportes máximos predecibles que pueden llegarse a presentar a lo largo del periodo de diseño, según lo que estos valores actuales nos permiten proyectar de manera teórica.

Las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de las proyecciones fueron las siguientes.

Concepto	Fórmula	Descripción
Población proyectada	$P_f = P_a * \Delta_c$	$P_a = Población actual$ $\Delta_c = Tasa de crecimiento poblacional$
Carga de DBO5 proyectada, Ton/año	$C_{DBO5} = P_f * PPC_{DBO5}$	$P_f = Población proyectada$ $PPC_{DBO5} = Aporte Per Cápita DBO5 \left(\frac{Ton}{año}\right)$
Carga de SST proyectada, Ton/año	$C_{SST} = P_f * PPC_{SST}$	$P_f = Población proyectada$ $PPC_{SST} = Aporte Per Cápita SST \left(\frac{Ton}{año}\right)$
Volumen de Agua Residual Generada, L/s	$V_{ARG} = PT_{au} * D * CR * FC$	$PT_{au} = Población total del área urbana$ $D = Dotación \left(\frac{L}{hab * d}\right)$ $CR = Coeficiente de retorno$ $FC = Factor de conversión$
Concentración DBO5 por punto de vertimiento, mg/L	$DBO_5 = \frac{C_{DBO5}}{Q}$	$C_{DBO5} = Carga DBO5 \left(\frac{mg}{s}\right)$ $Q = Caudal \left(\frac{L}{s}\right)$
Concentración SST en puntos de vertimiento, mg/L	$SST = \frac{C_{SST}}{Q}$	$C_{SST} = Carga SST \left(\frac{mg}{s}\right)$ $Q = Caudal \left(\frac{L}{s}\right)$

Tabla 20. Ecuaciones de proyección de carga y concentraciones (DBO5 y SST)
Fuente: Autores con base en el RAS, 2017 y el PSMV, 2017

12.4.5 Comparación de las descargas de vertimientos puntuales con los valores máximos permisibles de la Resolución 631 de 2015

Para determinar el nivel de degradación del recurso hídrico en los puntos de vertimiento de los cuerpos receptores de las descargas de vertimientos priorizadas por el PSMV, año 2017, se realizó una comparación de los aportes de DBO5 y SST de cada uno de estos puntos con lo estipulado por la resolución 631 del 2015, donde su artículo octavo establece los “valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas (ARD) de actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD Y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos superficiales de agua” siendo los valores restrictivos de los parámetros de DBO5 y SST equivalentes a 90 mg/L cada uno.

Para llevar a cabo este análisis, se hizo uso de las ecuaciones de concentración de DBO5 y SST por punto de vertimiento presentadas en la tabla 20.

12.4.6 Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con la DBO5

Con el objeto de conocer el factor de biodegradabilidad de las descargas de vertimientos, ya que este es un criterio a tomar en cuenta a la hora de optar por una alternativa de tratamiento biológico o químico, fue llevada a cabo una caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para cada uno de los puntos de vertimientos priorizados dentro del casco urbano, la cual se desarrolló mediante la siguiente ecuación

Concepto	Fórmula	Descripción
Relación entre la DQO y la DBO5 en los puntos de vertimiento	$F_{\frac{DQO}{DBO5}} = \frac{DQO}{DBO5}$	$DQO = \text{Demanda Química de Oxígeno } (\frac{mg}{L})$ $DBO = \text{Demanda Biológica de Oxígeno } (\frac{mg}{L})$

Tabla 21. Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Fuente: Autores con base en Alvarez-Vázquez, H., Jefferson, B., & Judd, S. J. (2004).

La significancia de los resultados de la caracterización se determinó con base a la siguiente tabla

$\frac{DQO}{DBO5}$	Interpretación
2.5 <	Mayor aporte orgánico
3 a 4	Difícil biodegradabilidad
>4	Fracción inerte alta

Tabla 22. Interpretación de la relación de la DQO con la DBO5

Fuente: Autores con base en Alvarez-Vázquez, H., Jefferson, B., & Judd, S. J. (2004).

La técnica fue segundo objetivo es la recolección de datos acerca de las caracterizaciones de los cuerpos hídricos y los instrumentos, el documento técnico del PSMV, las ecuaciones del modelo Streeter Phelps, las ecuaciones para el cálculo de concentraciones para los parámetros de calidad del agua DBO5 y SST, así como las Resoluciones 631 de 2015 y 3956 de 2009, para procesar dicha información posteriormente conocer el estado de salud de los afluentes a través de la comparación con la normativa vigente.

12.5 Metodología Tercer objetivo

Consistió en el paso a seguir para determinar las tecnologías de tratamiento de aguas residuales óptimas para el contexto que se presenta, así como las condiciones futuras. Ya que abarca el contexto territorial y municipal de Colombia, la “Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales” del doctor Juan Pablo Rodríguez Miranda, año 2015, fue escogida como la metodología para desarrollar la selección del método de tratamiento por el que se optó para el diseño de la Planta. En dicha metodología, el autor resalta los componentes fundamentales para ejecutar una selección de tecnologías, siendo necesario tener claro variables como la composición de las aguas residuales municipales y clasificarlas en función de la concentración de los contaminantes criterios que se manejen, siendo en este caso la DBO5 y SST; lo anterior con miras de relacionar las eficiencias de remoción de cargas de las tecnologías con la calidad del agua requerida en el efluente de la PTAR, así como con los indicadores de demanda energética, de área, generación de subproductos (como los lodos), y también

con los costos de inversión, operación y mantenimiento. Para los aspectos de localización de la Planta, como recomienda el autor, se hizo énfasis en las características del terreno tales como riesgos por deslizamiento, inundaciones, estabilidad geológica, la dirección de las corrientes de viento, con el objeto de evitar su desplazamiento hacia las comunidades y por último el garantizar la lejanía con ecosistemas estratégicos y zonas de recreación. Lo anterior con ayuda de los diferentes mapas suministrados por la alcaldía municipal. Completado el análisis anterior y en relación con la información ya obtenida acerca de nuestro contexto, se procedió a realizar la selección de las tecnologías que integran la configuración propuesta de la Planta, considerando tres atributos de evaluación estipulados por el autor: el atributo técnico, económico y ambiental.

Para el atributo técnico, que tiene como finalidad garantizar el cumplimiento normativo a través de la operación eficiente de la Planta, son tenidos en cuenta los parámetros de confiabilidad (operación en condiciones ambientales adversas), viabilidad (procesos de construcción simples y rápidos), flexibilidad (un efluente con la calidad esperada de manera continua, sin necesidad de una operación extensiva así como un mantenimiento sencillo), complejidad (procesos, reactores sencillos que produzcan buen rendimiento. Generalmente las tecnologías de tratamiento complejas no son necesariamente las óptimas), accesibilidad (el acceso a la planta debe ser sencillo), requerimiento de análisis y controles en variables que afectan el proceso de tratamiento y por último el tratamiento y manejo de subproductos (lodos y/o biogás).

En cuanto al atributo económico son tomados en cuenta los parámetros de costos para el agua residual tratada, requerimiento de área, empleo de energía, relación con otros proyectos, requerimiento personal calificado y participación local.

El último atributo por evaluar es el ambiental, donde se deben analizar parámetros tales como generación de olores, ruido, espumas, impacto estético, reutilización del agua residual tratada y estabilidad de la planta. Estos atributos se valoran cuantitativamente a través de una función de productoria, de modo que la tecnología que arroje el menor valor es la más adecuada.

$$ITO_{PTARM} = \prod_{i=1}^n P_i^{a_i}$$

Ecuación 2. Cálculo de selección de tecnologías

Fuente: Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015

Los puntales para P_i , que corresponde a los diferentes parámetros considerados (técnico, económico y ambiental), se establecen a partir de su cualificación de importancia con base a la siguiente tabla.

DESCRIPTOR	VALOR NUMÉRICO ASIGNADO (P)	CUALIFICACIÓN
Bajo	10	Importancia relativa más baja
Medio	20	Importancia relativa media
Alto	30	Importancia relativa alta

Tabla 23. Cualificación para cada parámetro
Fuente: Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015

Este análisis cuantitativo es consolidado en la matriz propuesta por el autor para el desarrollo metodológico de la selección, listando cada uno de los parámetros con sus correspondientes cualificaciones, pesos de importancia y la realización del cálculo ITOPTARM.

ATRIBUTO	PARÁMETRO	VALOR ASIGNADO (P)	PESO DE IMPORTANCIA (a)	P ^a
Técnico (42%)	Confiabilidad		0,06	
	Viabilidad		0,06	
	Flexibilidad		0,06	
	Complejidad		0,06	
	Accesibilidad		0,06	
	Requerimientos de análisis y controles		0,06	
	Tratamiento y manejo de subproductos		0,06	
Económico (36%)	Costos (inversión, operación y mantenimiento)		0,06	
	Requerimiento de área		0,06	
	Empleo de energía eléctrica		0,06	
	Relación con otros proyectos		0,06	
	Requerimiento de personal calificado		0,06	
Ambiental (22%)	Participación local		0,06	
	Generación de olores, ruidos y espumas		0,055	
	Impacto estético		0,055	
	Reutilización de aguas tratadas		0,055	
	Estabilidad de la PTARM		0,055	
ITA _{PTARM}				

Tabla 24. Matriz de selección de tecnologías
Fuente: Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015

Seleccionada la alternativa de tratamiento, los parámetros de diseño de cada una de las tecnologías fueron tomados del título E del RAS “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES” donde están reglamentadas las condiciones según las cuales deben ser desarrollados los cálculos y por tanto el diseño

y dimensionamiento de los equipos que componen una PTAR, como la que se propone en este proyecto de grado.

Con base a este título también fueron consolidadas las acciones a llevar a cabo para el óptimo funcionamiento del sistema, tales como las de la correcta operación y mantenimiento de los equipos, tratamiento y/o aprovechamiento de lodos generados, nivel de capacitación de operarios, así como consideraciones acerca de la seguridad laboral.

Las ecuaciones de diseño para cada una de las unidades elegidas finalmente para conformar el sistema de tratamiento de aguas residuales se presentaron y se explicaron dentro de su sección respectiva en los resultados, ya que estas son como tal el producto principal de este proyecto de investigación.

La técnica para el desarrollo del tercer objetivo fue la recolección de información acerca de las ventajas y desventajas de cada tecnología de tratamiento, considerando sus costos, eficiencias y demanda de operarios capacitados, mientras que su técnica fue el procesamiento de dichos insumos a través de la metodología de selección de tecnologías propuesta por Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015, para obtener el sistema de tratamiento más adecuado para el contexto que se presenta.

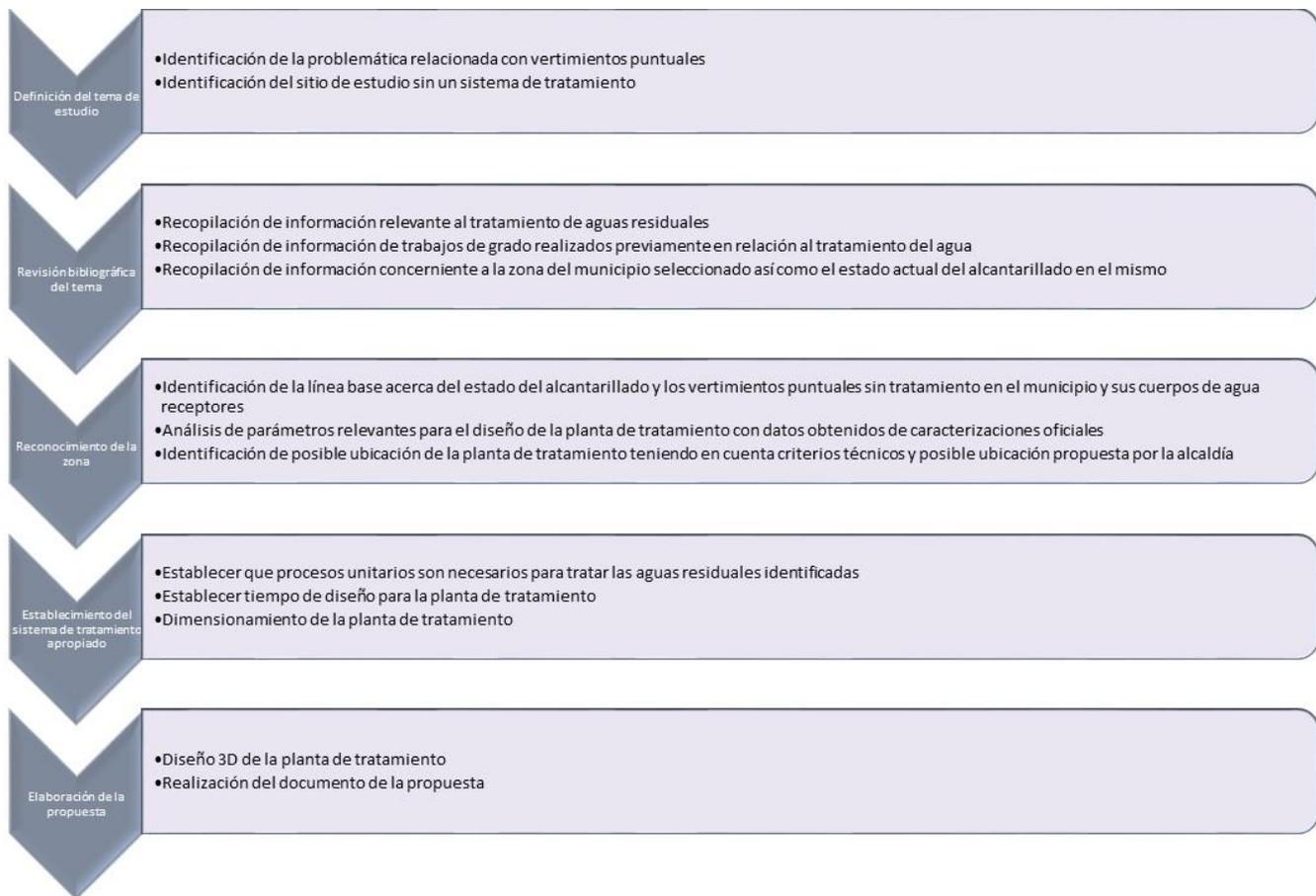


Figura 4. Diagrama de flujo metodología a seguir.

Fuente: Autores.

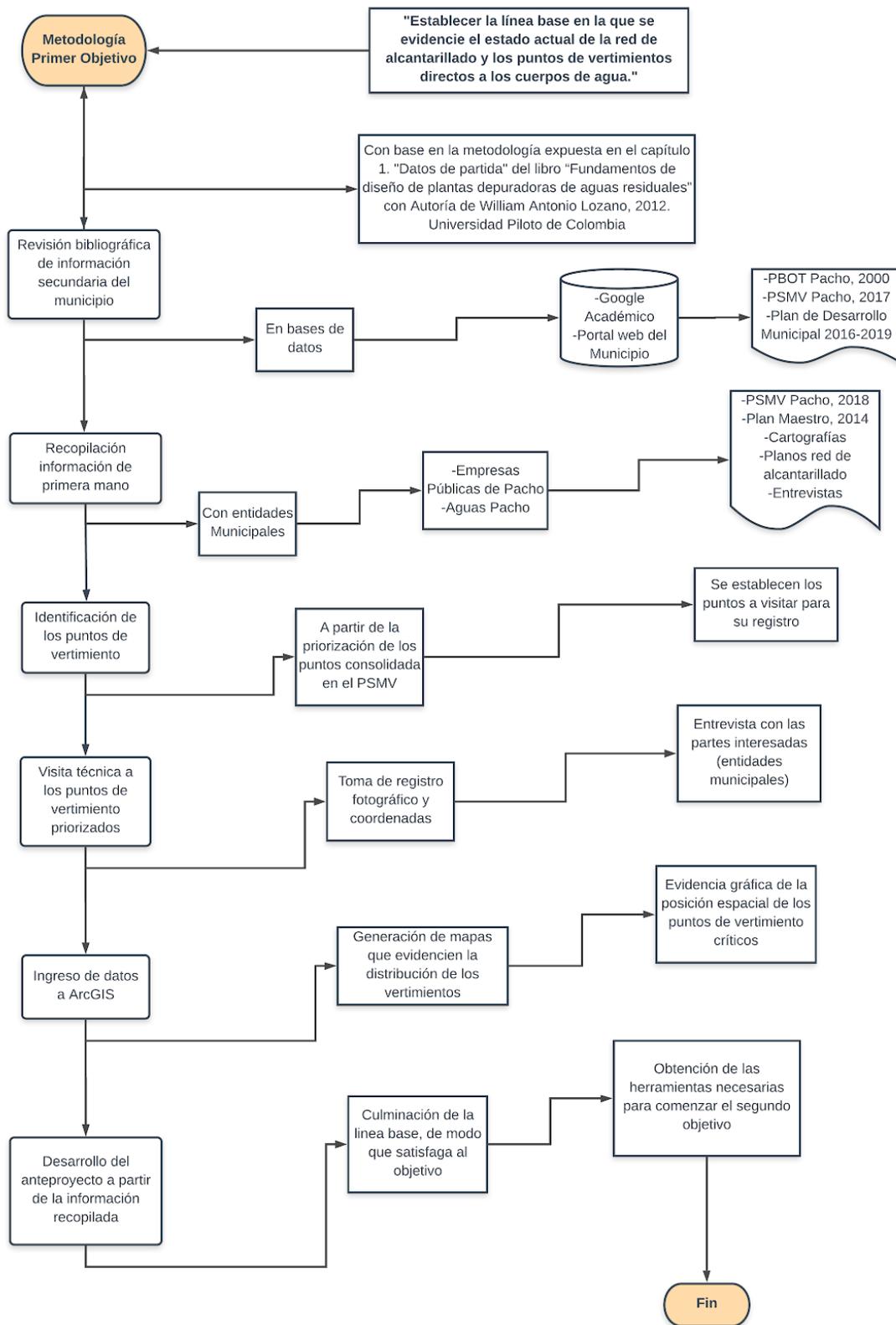


Figura 5. Metodología del primer objetivo

Fuente. Autores.

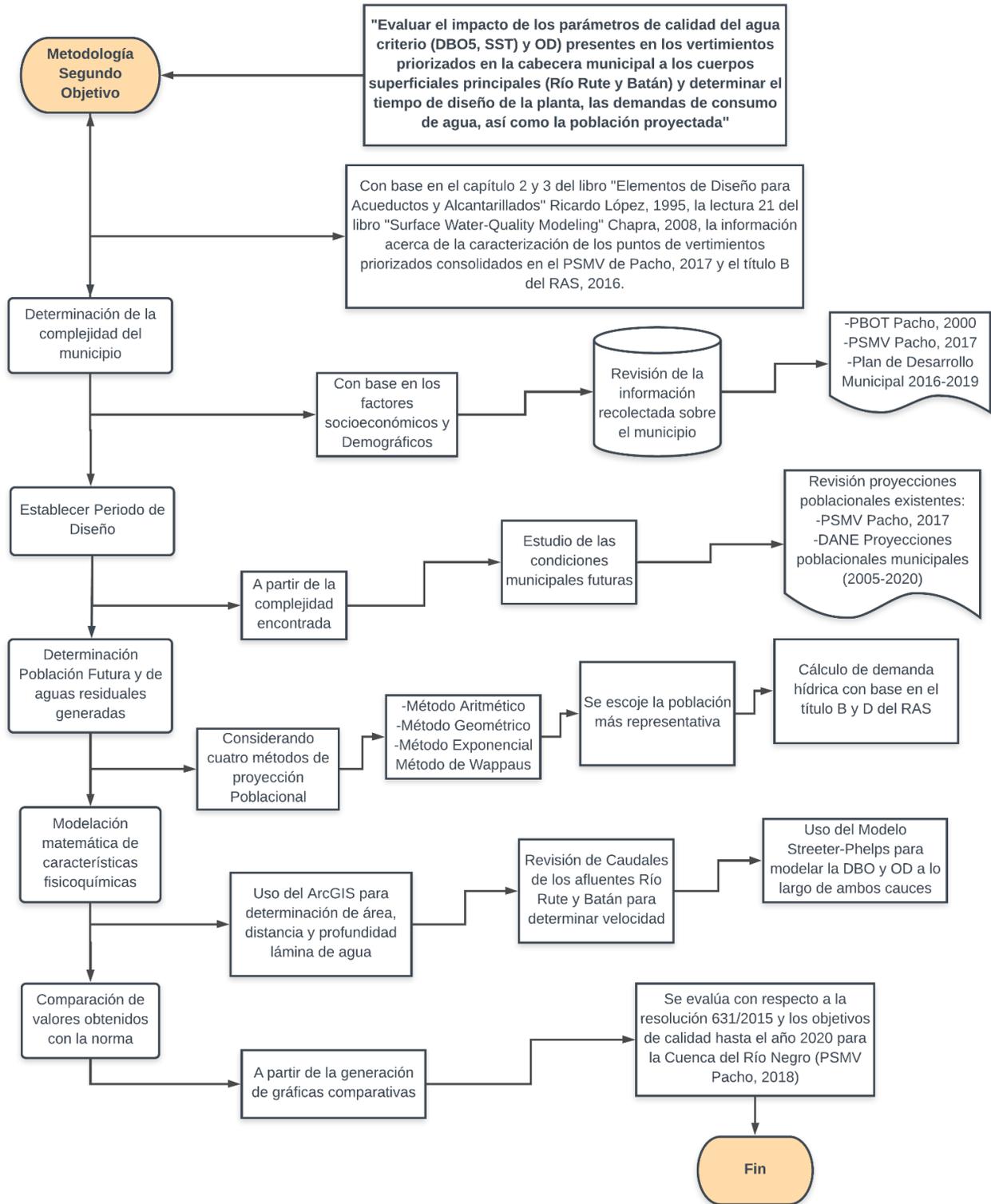


Figura 6. Metodología del segundo objetivo.

Fuente. Autores.

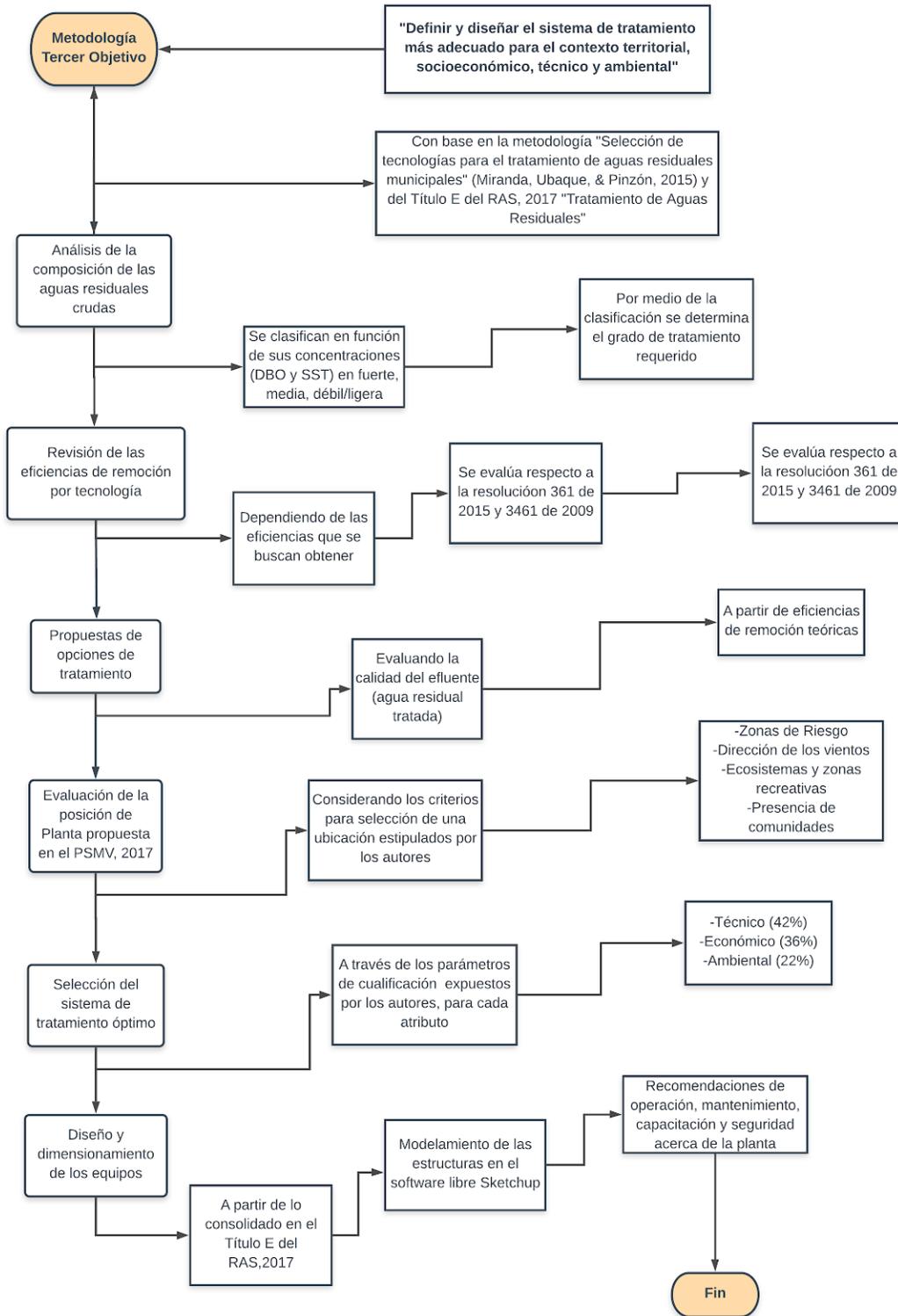


Figura 7. Metodología del tercer objetivo
Fuente. Autores.

13.2 Presupuesto contemplado del proyecto

PRESUPUESTO			
ÍTEM	Cantidad	Valor (COP)	TOTAL ÍTEM (COP)
Pasaje de flota Bogotá - Pacho	4	\$ 12,000.00	\$ 48,000.00
Alimentación (almuerzo)	2	\$ 10,000.00	\$ 20,000.00
Cámara Fotográfica Fujifilm	1	\$ 355,000.00	\$ 355,000.00
Smartphone Xiaomi redmi note 5	1	\$ 600,000.00	\$ 600,000.00
Licencia de ArcGIS	1	\$ 343,742.40	\$ 343,742.40
Sketchup Studio para estudiantes	1	\$ 189,058.32	\$ 189,058.32
Planilla	1	\$ 4,000.00	\$ 4,000.00
Fotocopias de matrices de visita	2	\$ 200.00	\$ 400.00
Horas de trabajo auxiliar Aguas Pacho E.S.P	3	\$ 3,450.00	\$ 10,350.00
Horas de trabajo autores	444	\$ 5,000.00	\$ 2,220,000.00
Horas de tutoría docente	14	\$ 31,250.00	\$ 437,500.00
		TOTAL (COP)	\$ 4,228,050.72

Figura 9. Presupuesto contemplado del proyecto
Fuente. Autores

14 Aspectos éticos

Los aspectos éticos que fueron abordados en el desarrollo de este proyecto son aquellos referentes a la transparencia de la información que es presentada, donde para cumplir con esta, fue realizada un levantamiento de información responsable haciendo uso de herramientas de búsqueda reconocidas y con validez académica, tal como fue consolidado en el apartado del Estado del Arte y así mismo, los resultados que fueron obtenidos a través del procesamiento de dicha información por medio de la metodología, fueron presentados con total transparencia, de modo que aquellos que hagan consulta de este documento tengan acceso a una información verídica. Las referencias sustraídas de la literatura fueron citadas, dándoles los correspondientes créditos a sus respectivos autores, según lo dispuesto por las Normas APA en su sexta edición. En cuanto a la parte técnica, aspectos tales como la localización de la planta, su distancia con respecto a las comunidades, a los ecosistemas y la determinación de dirección de los vientos emitidos fueron realizados de manera responsable, tomando las respectivas recomendaciones y restricciones descritas en la literatura consultada. También se consideró lo correspondiente a la seguridad operativa de la planta y sus equipos, tal como el control de olores ofensivos, manejo y/o aprovechamiento de lodos y consideraciones a tener en cuenta para la seguridad de los operarios, fueron consolidadas en la descripción y explicación del funcionamiento y mantenimiento de las estructuras, todo lo anterior descrito fue tomado en cuenta para el desarrollo de las recomendaciones.

15 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de cada una de las metodologías utilizadas para dar respuesta a la pregunta de investigación y una solución a la problemática. Se presentan de forma separada por objetivo, sin embargo, los productos del desarrollo de cada objetivo son utilizados en el siguiente.

15.1 Resultados primer objetivo

Dando desarrollo al primer objetivo se encontraron diversos documentos y material gráfico, como planos y cartografías, en donde se evidencia el estado del municipio. Este apartado describe el municipio en términos de Clima, Hidrografía, Uso del suelo, Tipo de alcantarillado presente y lo que implica, Vertimientos presentes en el municipio, Caracterizaciones de estos vertimientos y por último la normatividad a ser objetivo de comparación.

15.1.1 Descripción de la zona

El municipio de Pacho, Cundinamarca se encuentra localizado al Noroccidente del departamento de Cundinamarca, limita al norte con los municipios de San Cayetano, Villagómez y Topaipí; en el sur tiene límites con Supatá y Subachoque; en el occidente con el municipio de Vergara y el Peñón; por último, en el Oriente el municipio de Zipaquirá, Tausa y Cogua (Concejo municipal, 2016).

Tiene una extensión de 40.340.25 Ha con una altitud media de 2136 m.s.n.m con cotas de entre los 1000 m y 3700m, sin embargo, el perímetro urbano se encuentra a 1790 m. El perímetro urbano se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas 5° 22'' y 5° 8'' de latitud Norte y los 74° 18'' y 74° 4'' de longitud Oeste (Concejo municipal, 2016).

El municipio cuenta con una temperatura promedio de 22.9°C y una temperatura máxima de hasta 27.6°C (Concejo municipal, 2016), además cuenta con una precipitación al año de 1609 mm donde la mayor porción de lluvias en el municipio se encuentra en el mes de Octubre.

Principalmente el municipio de Pacho, Cundinamarca específicamente en su casco urbano, cuenta con una red de alcantarillado compuesta por tramos de red sanitaria, tramos de red pluvial y tramos combinados generados por conexiones erradas existentes (Concejo municipal, 2016).

Estas tuberías cuentan con diámetros entre 6 y 32 pulgadas con un material de Concreto, Gres y PVC, además, para el 2014 el casco urbano contaba con 3128 usuarios de la red teniendo una cobertura del 81% contando con una longitud aproximada de 34.75 Km, el restante 19% no cuentan con conexiones a la red lo que genera que viertan sus aguas residuales a los cuerpos de agua aledaños a ellos, sin embargo en el PSMV 2017 se presentan 3276 con una cobertura de 77.8% teniendo en cuenta que los usuarios potenciales para el 2017 en el municipio son 4029 (Concejo municipal, 2016)(Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017).

15.1.2 Usos del Suelo y actividades Económicas Predominantes

Por medio de la información suministrada por PBOT del municipio, en el plano de usos del suelo (véase figura 10), se evidenció que en el área metropolitana de Pacho existe un predominio de uso del suelo para fines comerciales y residenciales, enfocándose mayoritariamente estos hacia el centro del casco urbano, siendo este último rodeado por una amplia zona que se ha destinado para la protección y conservación. Además, una importante parte del territorio se utiliza para el uso institucional y de patrimonio histórico y cultural. Zonas de una menor proporción son destinadas para el desarrollo del sector turístico, de recreación y áreas verdes, así como de equipamientos. Por medio de la zonificación de uso del suelo se evidenció el desarrollo comercial como la actividad económica predominante en el área metropolitana del municipio, también se puede identificar el turismo como actividad económica de importancia por cuenta de la existencia de una buena proporción del terreno utilizada para el patrimonio histórico y cultural.

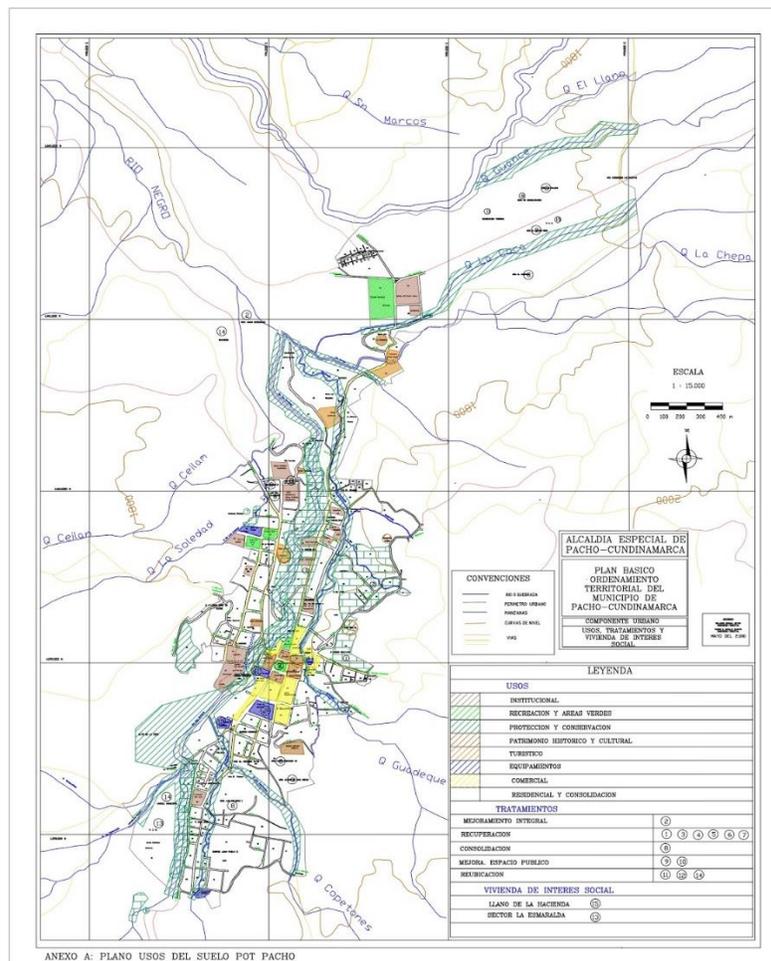


Figura 10. Plano usos del suelo Pacho Cundinamarca
Fuente. PBOT Pacho, 2000.

15.1.3 Estado del alcantarillado del municipio de Pacho, Cundinamarca y sus vertimientos.

15.1.3.1 Alcantarillado

Teniendo en cuenta el PBOT de Pacho del 2000, se identificó que el municipio cuenta con un sistema en su mayoría compuesto de alcantarillado combinado, pluvial y residual, lo que significa que no tiene tuberías que realicen la separación de aguas residuales y lluvias, lo que implica que dentro de los caudales a tener en cuenta para el dimensionamiento de la planta, la lluvia tendrá importancia ya que en caso de fuertes precipitaciones, el volumen que podría contener el sistema de tratamiento se verá excedido y se producirían inundaciones y a su vez peligros de diseminación de enfermedades y aumentar el riesgo de deslizamiento en masa de zonas aledañas.

Aunque si bien es cierto que el alcantarillado no es en su totalidad combinado, es recomendable igual tener en cuenta este aspecto ya que el municipio presenta una precipitación media anual de poco más de 1600 mm, que teniendo en cuenta el área del municipio son cerca de 1100 litros/s que la planta de tratamiento tendría que almacenar en temporadas de fuertes lluvias.

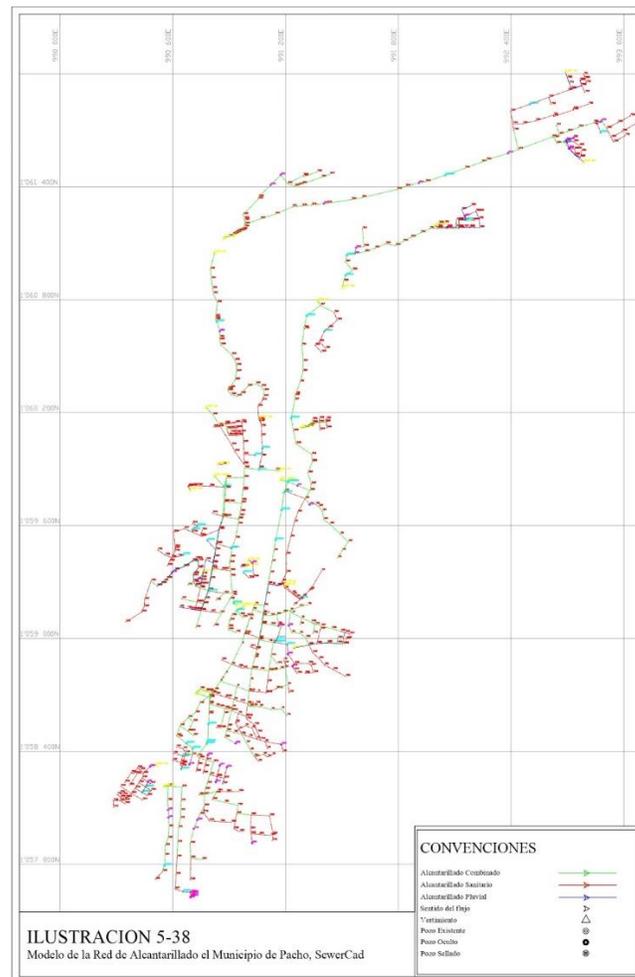


Figura 11. Red de Alcantarillado de Pacho clasificado.
Fuente PBOT Pacho, 2000.

15.1.3.2 Vertimientos identificados

Aunque en su plan de desarrollo 2016-2019 presente una lista de 24 puntos de vertimiento, en el PSMV de 2017 se da un recuento de 27 evidenciando que al paso del tiempo se han visto incrementados estos puntos de vertimientos de aguas residuales sin tratar a los cuerpos de agua, que en el plan de desarrollo listan 8 cuerpos de agua que están siendo afectados por estos, dichos vertimientos están divididos en 20 puntos conectados a la red de alcantarillado y otros 7 vertimientos que no cuentan con una red de alcantarillado, estos 7 últimos están siendo vertidos hacia el suelo según la consultora 2016 - 2017, estos puntos de vertimiento están listados en la tabla 25 evidenciando su ubicación en coordenadas planas así como una breve descripción como se ve a continuación (Empresas públicas de Cundinamarca, 2017).

A continuación, se presenta la identificación de los 6 puntos de vertimiento más relevantes presentes en el municipio que descargan hacia fuentes hídricas y su descripción donde se evidencia la cantidad de usuarios y su área aferente.

Vertimiento	Sector relacionado	Coordenadas planas		Fuente receptora	Descripción
		NORTE	ESTE		
Vert 1	Vereda Villa Esperanza	990877	1061128	Río Rute (San Antonio)	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 871 usuarios correspondiendo a 3325 habitantes. Hectáreas aferentes 77.82 Ha
Vert 2	Vereda La Ferreria	991447	1060867	Río Batan	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 173 usuarios correspondiendo a 663 habitantes. Hectáreas aferentes 15.49 Ha
Vert 3	Vereda Los Portales	991338	1060793	Río Batan	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 407 usuarios correspondiendo a 1553 habitantes. Hectáreas aferentes 36.38 Ha
Vert 5	Colegio Ana francisca Lara	991100	1059831	Río Rute (San Antonio)	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 822 usuarios correspondiendo a 3139 habitantes. Hectáreas aferentes 73.48 Ha
Vert 6	Barrio La Palmita	991187	1059888	Río Rute (San Antonio)	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 403 usuarios correspondiendo a 1537 habitantes. Hectáreas aferentes 35.99 Ha
Vert 10	Vereda San José	990538	1058225	Río Rute (San Antonio)	Vertimiento que recoge y descarga las aguas residuales combinadas transportando aguas residuales de 121 usuarios correspondiendo a 463 habitantes. Hectáreas aferentes 10.84 Ha

Tabla 25. Identificación de vertimientos relevantes a cuerpos de agua y sus coordenadas
Fuente. Empresas públicas de Cundinamarca - PSMV 2017 adaptado.

De estos 27 puntos de vertimiento se realizaron 6 caracterizaciones correspondientes a los vertimientos 1, 2, 3, 5, 6, 10. Este muestreo presentado en la información complementaria del PSMV 2017 fue realizado por el Laboratorio IHA - INSTITUTO DE HIGIENE AMBIENTAL S.A.S, laboratorio acreditado por el IDEAM, estos resultados de la caracterización se pueden ver en la tabla 26. (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017).

	Aspecto	Unidades	Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 5	Vert 6	Vert 10
Coordenadas	NORTE	-	990877	991447	991338	991100	991187	990538
	ESTE	-	1061128	1060867	1060793	1059831	1059888	1058225
Caudal		L/s	4.121	0.267	1.707	10.745	3.214	3.322
DBO5		mg/L	36.2	231.5	592.6	293.5	383.2	291.1
DQO		mg/L	43.5	250.6	615.7	669.8	407	564.1
SST		mg/L	20.5	110.7	208.8	300.8	131	192.2
Temperatura in situ		°C	21.4	19.8	20.2	19.7	18.7	20.1
pH		Unidades	7.6	7.7	7.7	7.3	7.2	7.6
Oxígeno Disuelto		mg/L	2.01	1.86	1.81	0.7	1.56	<0.10

*Tabla 26. Caracterización 6 vertimientos priorizados.
Fuente. Empresas Públicas de Cundinamarca - PSMV 2017*

Estos 6 puntos de vertimientos fueron priorizados para su caracterización teniendo en cuenta los que estos tienen las mayores áreas de servicio sanitario, así como los mayores aportes de aguas residuales per cápita, además de que son vertimientos realizados directamente a los 2 cuerpos de agua principales del municipio siendo estos el Río Rute (San Antonio) y el Río Batán (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017)

De estos 6 puntos se pudo observar como sus concentraciones de DBO5, DQO y SST son similares entre sí y si se compararan con la normatividad, que más adelante se presenta, presentan un exceso en los límites permisibles. Estos parámetros fisicoquímicos en especial la DBO5 y DQO pueden determinar qué sistema de tratamiento hace falta en estos puntos ya que dependiendo de su relación significaría un vertimiento el cual sea más eficiente tratarlo biológicamente o un vertimiento el cual requiere un tratamiento fisicoquímico.

Observando el oxígeno disuelto puede estar directamente relacionado con la DBO5 por lo que a mayor DBO5 se consume en mayor cantidad el oxígeno disponible en el cuerpo de agua lo que repercutiría en una pérdida de hábitat favorable para especies acuáticas y vegetación alrededor del cuerpo de agua.

Dentro de este PSMV se encuentra la caracterización de 2 cuerpos de agua que reciben estos vertimientos como se muestra a continuación en la tabla 27 y 28 para el Río Rute (San Antonio) y el Río Batán respectivamente con datos acerca de los parámetros fisicoquímicos y biológicos necesarios para la elaboración de una PTAR, teniendo en cuenta mediciones antes y después 100 m de los vertimientos a los cuerpos de agua, también se tiene presente la cuenca y la zona a la que pertenece este cuerpo de agua.

Caracterización Río Rute (San Antonio)				
Cuenca		Río Negro		
Subcuenca		Río Alto Negro		
Fuente hídrica		Río Rute (San Antonio)		
Vertimientos		No. 1, 5, 6, 10.		
Aspecto		Unidad	Aguas Arriba	Aguas Bajo
Distancia del vertimiento		m	100	100
Coordenada	NORTE	-	990496	990819
	ESTE	-	1058109	1061189
Caudal		L/s	371.25	581
DBO5		mg/L	4.7	7.9
DQO		mg/L	<32	<32
SST		mg/L	<20	<20
Oxígeno disuelto		mg/L	7.69	6.08
pH		Unidades	7.1	7.9
Temperatura in situ		°C	17.8	21.3

Tabla 27. Caracterización Río Rute (San Antonio).
Fuente. Empresas Públicas de Cundinamarca - PSMV 2017

Caracterización Río Batán				
Cuenca		Río Negro		
Subcuenca		Río Alto Negro		
Fuente hídrica		Río Batán		
Vertimientos		No. 2 y 3		
Aspecto		Unidad	Aguas Arriba	Aguas Bajo
Distancia del vertimiento		m	100	100
Coordenada	NORTE	-	991614	991268
	ESTE	-	1060873	1060832
Caudal		L/s	40	54.5
DBO5		mg/L	5.1	22.1
DQO		mg/L	<32	32.2
SST		mg/L	<20	<20
Oxígeno disuelto		mg/L	7.94	4.62
pH		Unidades	7.8	7.4
Temperatura in situ		°C	19.7	21.7

Tabla 28. Caracterización Río Batán.
Fuente. Empresas Públicas de Cundinamarca - PSMV 2017.

Con el fin de no dejar de evaluar los vertimientos no caracterizados, el PSMV establece valores presuntivos para cargas contaminantes para los 21 vertimientos restantes donde se toman los valores que establece la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca para la concentración de las metas de cargas contaminantes y cobros de tasas retributivas que estén acordes con las estimaciones de producción per cápita de cargas contaminantes unitarias de origen doméstico, expuestos en la Resolución 0330 de 2017 – RAS 2017 (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017)(Minvienda, 2017).

Parámetro	Intervalo	Valor sugerido
DBO 5 días, 20°C, g/hab*d	25 - 80	50
Sólidos en suspensión, g/hab*d	30 - 100	50

Tabla 29. Valores sugeridos por RAS 2017. Aportes Per Cápita Aguas residuales Domésticas.
Fuente. Empresas Públicas de Cundinamarca - PSMV 2017.

Se consultó el informe técnico del PSMV 2018, este contiene las cargas contaminantes de DBO5 y SST, además de su caudal de todos los vertimientos listados, 27 específicamente, sin embargo, solo se consultan los datos de los 6 puntos de vertimiento priorizados, teniendo en cuenta que el aporte de los demás puntos de vertimiento es mínimo o no afectan en gran proporción, para futuros cálculos y comparación en normatividad.

Aspecto	Unidades	Año 2018
Población	Habitantes	16064
Cobertura de la red	%	77.80%
Volumen total de agua residual generada	m3/año	589870
Volumen de agua residual recolectada	m3/año	458919

DBO5 $\frac{T}{\text{año}}$		SST $\frac{T}{\text{año}}$	
Total vertimientos	Generada	Total vertimientos	Generada
	335		287
1	51.5	1	53.9
2	1.9	2	0.9
3	31.5	3	11.1
5	98	5	100.5
6	38.3	6	13.1
10	30.1	10	19.8

Tabla 30. Caracterización de cargas contaminantes por vertimiento DBO5 y SST 2018.
Fuente. PSMV, 2018

En base a esto último el informe técnico para el 2018, presentado por la empresa que presta el servicio de alcantarillado, no contiene datos de cada uno de los parámetros que se deben evaluar junto a la normatividad, sin embargo, si contiene datos de DBO5 y SST, estos tienen una proyección a largo plazo hasta 2033 teniendo como datos para el anterior año 2018 en DBO5 una carga contaminante de 335 t/año y en SST una carga contaminante de 287 t/año con un caudal total de vertimientos generados de 589.870 m3/año, sin embargo al tener una cobertura del 77.8% como se ha mencionado anteriormente, se tiene un caudal de vertimientos recolectados de 458.919 m3/año (CAR, 2018)

Teniendo en cuenta la Resolución 3461 de 2009 donde se establecen los objetivos de calidad para la cuenca alta del Río Negro para el año 2020, el municipio cuenta con una clasificación de CLASE II lo que deriva en la siguiente tabla 31. donde se establecen los parámetros a cumplir para esta cuenca.

Parametro	Unidades	Valor mas restrictivo
Parametros organicos		
DBO	mg/L	20
OD	mg/L	>4
COLIFORMES TOTALES	NMP/100ml	>20000
Solidos		
SST	mg/L	2000

Tabla 31. Objetivos de calidad para la cuenca alta del Río Negro 2020.

Fuente. Resolución 3461 de 2009 de la CAR.

Con respecto a la Resolución 631 de 2015, donde se establecen los parámetros a considerar, así como su límite permisible en aguas residuales de los prestadores del servicio del servicio público de alcantarillado, se destaca la siguiente tabla de parámetros.

Parametro	Unidad	Valor maximo
DQO	mg/L O2	180
DBO5	mg/L O2	90
SST	mg/L	90

Tabla 32. Parámetros máximos permisibles en aguas residuales de los prestadores del servicio de alcantarillado igual o mayor a 625 kg/día y menor a 3000 kg/día.

Fuente. Resolución 631 de 2015 de Minambiente.

La anterior tabla muestra los parámetros que deben cumplir los vertimientos realizados a los cuerpos de agua por parte del prestador del servicio de alcantarillado en el municipio, teniendo en cuenta esto se hace necesaria la comparación de los parámetros de calidad del agua para la cuenca alta del río Negro y los parámetros requeridos por la Resolución aún vigente 631 de 2015.

En cuanto a una PTAR para el municipio, se encontró evidenciado en diversos documentos, por ejemplo en su plan de desarrollo 2016-2019, que no hay existencia de una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio lo que ha derivado en la afectación previamente dicha a los 8 cuerpos de agua presentes en el municipio, estos cuerpos de agua están identificados como: Río San Antonio, Río Batán, Quebrada Los Copetones, Quebrada Gotaque, Quebrada Quebraditas entre otras ubicadas en la cuenca alta del Río Negro (Concejo municipal, 2016).

Sin embargo dentro del PSMV 2017 de la empresa encargada del alcantarillado del municipio presenta un proyecto donde estos 25 de los 27 vertimientos se vean interconectados y que sean llevados a una ubicación donde en un futuro pueda existir una planta de tratamiento para estos vertimientos donde el mismo PSMV especifica el objetivo de disminuir en un 85% las cargas contaminantes de DBO5 y SST,

estas actividades de interconexión de los tramos de tubería de los vertimientos están planeados en rangos de tiempo de corto y largo plazo (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017).

Con el fin de enviar todos los vertimientos a esta zona destinada para la construcción de la PTAR, se estableció un sistema de bombeo en el sector la Ferrería, sin embargo, dentro del plan maestro del municipio se evidenciaron que los vertimientos No. 9 y No. 27 no podrían ser parte de esta unificación de vertimientos teniendo en cuenta las características de pendientes prolongadas, diferencias de niveles o cotas lo que presentaría una dificultad técnica (Concejo municipal, 2014) (Empresas Públicas de Cundinamarca, 2017).

Se realizó una visita técnica a los 6 puntos de vertimiento identificados como prioritarios por la empresa encargada del servicio de alcantarillado, se registraron los datos en una matriz de recopilación de datos espaciales con una breve descripción de la zona a la que pertenece la fotografía y coordenadas, así como el vertimiento identificado. Esto es posible evidenciarlo en la tabla 33.

Punto	Coordenadas			Área Aferente	Nombre ubicación	Fotografía	Descripción
	Latitud	Longitud	Error GPS				
1 (Vert 10)	5.149322	-74.159007	3 m (error gps)	10.48 Ha	Pajonales		En la visita a este punto de vertimiento encontramos un pozo el cual resulta de la recolección de aguas a lo largo del sector de pajonales, este sector se caracteriza por ser domiciliario y de algunos cultivos. Este es el punto de vertimiento mas alejado del casco urbano
2 (Vert 2)	5.146864	-74.154856	3 m (error gps)	15.49 Ha	La ferrería		La visita a este punto permitió observar que la tubería que descarga al río se ve cubierta por el mismo cauce del río teniendo en cuenta la temporada de invierno en la que se realizó la visita. Este sector se caracteriza por recoger aguas residuales domiciliarias y hay presencia de algunos establecimientos comerciales como restaurantes y tiendas pequeñas
3 (Vert 3)	5.146468	-74.155402	3 m (error gps)	36.38 Ha	Los portales		La visita a este punto permitió observar que la tubería que descarga al río se ve cubierta por el mismo cauce del río teniendo en cuenta la temporada de invierno en la que se realizó la visita. Una de las principales características de este punto es que no fue posible la fotografía de la tubería debido a que no se tuvo acceso al predio privado, sin embargo se llegó a una aproximación bastante cerca para tomar las coordenadas y fotografía del cuerpo de agua receptor
4 (Vert 5)	5.137059	-74.157317	3 m (error gps)	73.48 Ha	Colegio Ana francisca Lara		En la visita a este punto se pudo evidenciar como el caudal de vertimientos se ve a simple vista a una altura considerable sobre el recurso hídrico, esta fotografía no se logro tomar de una distancia mas cercana debido a al cobertura vegetal espesa y al diámetro del río en esta época del año
5 (Vert 6)	5.137513	-74.157923	3 m (error gps)	35.99 Ha	La Palmita	Sin registro fotográfico	Este punto de vertimiento se ubica directamente al frente del punto anterior, no se logro tomar la fotografía teniendo en cuenta la espesa cobertura vegetal, sin embargo la ayuda del guía que acompaño la visita técnica fue de ayuda para la ubicación del punto
6 (Vert 1)	5.1236850	-74.1633830	3 m (error gps)	77.82 Ha	Esperanza		Este punto de vertimiento es el mas alto de los 6 puntos de vertimiento donde la espesa cobertura vegetal imposibilito el acercamiento a la tubería, sin embargo este punto recoge únicamente vertimientos domiciliarios en los barrios mas altos del municipio con algunas casetas como tiendas.
Nombre del responsable: Jaime Orlando Sánchez y Santiago Bustos Colmenares Hora: 11:00 am - 12:30 pm Fecha: 23/03/2019 Clima: Invernal con altas precipitaciones							

Tabla 33. Registro visita técnica realizada a los 6 principales puntos de vertimiento en el municipio Fuente. Autores

15.1.3.2 Ubicación de los puntos de vertimiento priorizados

A continuación, se presentan las ubicaciones de los vertimientos priorizados por parte del municipio para darles un tratamiento, esto debido a que son los puntos que presentan grandes concentraciones de contaminantes criterio y están ubicados directamente sobre los cuerpos de agua más importantes en el municipio, como lo son el Río Rute y el Río Batán.



Figura 12. Ubicación de los puntos de vertimiento priorizados en Pacho.
Fuente. Autores

15.2 Resultados segundo objetivo

15.2.1 Población existente y proyectada cabecera municipal

En base a la Proyección de Población por método de componentes, para el PSMV del Casco Urbano de Pacho, se determinó que el municipio cuenta con 16154 habitantes de la cabecera municipal, además de 309 como población flotante, arrojando un nivel de complejidad medio-alto.

PERIODO	AÑO	CABECERA	POBLACION FLOTANTE	POBLACION TOTAL	NIVEL DE COMPLEJIDAD
ACTUAL	2017	15763	301	16064	MEDIO ALTO
CORTO PLAZO	2018	15985	305	16290	MEDIO ALTO
	2019	16154	309	16463	MEDIO ALTO
MEDIANO PLAZO	2020	16351	312	16663	MEDIO ALTO
	2021	16676	319	16995	MEDIO ALTO
	2022	17008	325	17333	MEDIO ALTO
LARGO PLAZO	2023	17347	331	17678	MEDIO ALTO
	2024	17692	338	18030	MEDIO ALTO
	2025	18044	345	18388	MEDIO ALTO
	2026	18403	351	18754	MEDIO ALTO
	2027	18769	358	19127	MEDIO ALTO
	2028	19142	366	19508	MEDIO ALTO
	2029	19523	373	19896	MEDIO ALTO
	2030	19912	380	20292	MEDIO ALTO
	2031	20308	388	20696	MEDIO ALTO
	2032	20172	396	21108	MEDIO ALTO

Tabla 34. Estimación de poblaciones de cabecera y flotante para el 2019.

Fuente. Estudios y Diseños de Sistemas de Tratamiento de Aguas residuales para el Municipio de Pacho. 2015.

CENSO DEL 9 DE MAYO DE 1951

MUNICIPIOS	POBLACION TOTAL			CABECERAS			RESTO DEL MUNICIPIO		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres

DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA (Conclusión)

Nimaima..	4.207	2.228	1.979	182	87	95	4.025	2.141	1.884
Nocaima..	5.665	3.084	2.581	781	320	461	4.884	2.764	2.120
Pacho..	26.280	12.967	13.313	4.118	1.808	2.310	22.162	11.159	11.003
Pasme..	8.536	4.497	4.039	322	155	167	8.214	4.342	3.872
Pandi..	14.885	7.759	7.126	799	405	394	14.086	7.354	6.732
Pasca..	9.924	5.188	4.736	781	373	408	9.143	4.815	4.328
Puerto Salgar..	6.204	3.499	2.705	3.621	2.099	1.522	2.583	1.400	1.183
Pulí..	5.008	2.593	2.415	642	317	325	4.366	2.276	2.090
Quebradanegra..	4.508	2.328	2.180	295	130	165	4.213	2.198	2.015
Quetame..	6.454	3.263	3.191	558	276	282	5.896	2.987	2.909
Quipile..	11.415	6.042	5.373	631	298	333	10.784	5.744	5.040
Rafael Reyes..	8.319	4.548	3.771	2.394	1.113	1.281	5.925	3.435	2.490
Ricaurte..	5.351	2.820	2.531	265	137	128	5.086	2.683	2.403
San Antonio..	7.811	4.013	3.798	318	149	169	7.493	3.864	3.629
San Bernardo..	9.606	5.024	4.582	1.642	847	795	7.964	4.177	3.787
San Cayetano..	7.142	3.612	3.530	449	192	257	6.693	3.420	3.273

Tabla 35. Censo Poblacional para el Departamento de Cundinamarca, año 1951

Fuente: Decreto-Ley número 1905 de 1954

Por medio de esta información se estableció el periodo de diseño de la PTAR a 25 años, a continuación, se determinó la población proyectada para el año 2044 por medio de los métodos Aritmético, Exponencial, Geométrico y de Wappaus, teniendo en cuenta los datos de la Proyección de Población por método de componentes de los años 2017 y 2019, para el PSMV del Casco Urbano de Pacho, así como los del primer censo poblacional del que se tiene registro, Desarrollado por el DANE en el año 1951:

PROYECCIONES DE POBLACIÓN	
DATOS DE PARTIDA	
Pob censo inicial (1951)	4118
Pob censo 2017 (proyectada)	16064
Pob censo 2019 (proyectada)	16463
Nivel de complejidad	Medio alto
Tiempo de diseño (años)	25
MÉTODOS DE PROYECCIÓN	
Método de proyección	Población Final
Aritmético	21002
Exponencial	12926
Geométrico	27679
Wappaus	41234
UMBRAL DE ACEPTABILIDAD	
PROMEDIO	25710
PROMEDIO +10%	28281
PROMEDIO -10%	23139

Tabla 36. Proyecciones poblacionales

Fuente: Autores con base en los censos poblacionales oficiales

15.2.2 Descarte de Métodos de Proyección Poblacional

Se realiza por medio del cálculo del promedio de la población final de todos los métodos que se tuvieron en cuenta, cantidad a la cual se le adiciona un valor equivalente al 10% del promedio obtenido, así mismo a esta media se le debe restar el valor equivalente al 10% del mismo promedio, de modo que, una vez calculado el umbral de aceptabilidad, se verifique cuáles son los métodos que deben ser descartados por arrojar poblaciones fuera del conjunto establecido.

Obtenido el umbral de aceptabilidad, las proyecciones de población por método aritmético, exponencial y Wappaus, que cuentan con 21002, 12926 y 41234 habitantes respectivamente son descartadas ya que sus proyecciones no se encuentran dentro del mencionado umbral.

15.2.3 Población Proyectada Determinada

Descartados los métodos de proyección de población que correspondían, se determina la población proyectada al tiempo de diseño como la calculada por el Método Geométrico, la cual equivale a 27679 habitantes residiendo en el casco urbano para el año 2044.

15.2.4 Tasa de Crecimiento Poblacional Anual Proyectada

Para el desarrollo de la Tasa de Crecimiento Poblacional Anual, se toma como base para el cálculo la proyección de población al año actual presentada en el PSMV del año 2017, así como la proyección poblacional para el tiempo de diseño (25 años) obtenida por medio del Método Geométrico.

$$Tasa\ de\ crecimiento\ anual = \left(\frac{\left(\frac{hab\ 2044 - hab\ 2019}{hab\ 2019} \right) * 100}{2044 - 2019} \right)$$

Ecuación 3. Cálculo de la Tasa de Crecimiento Poblacional Anual
Fuente. APHEO

Reemplazando:

$$Tasa\ de\ crecimiento\ anual = \left(\frac{\left(\frac{(27679\ hab - 16463\ hab)}{16463\ hab} \right) * 100}{2044 - 2019} \right) = 2.7\%$$

Ecuación 4. Cálculo de la Tasa de Crecimiento Poblacional Anual desarrollado
Fuente. APHEO

15.2.5 Cálculo de la demanda de agua

15.2.5.1 Caudal domestico

Rigiéndose en el título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, Resolución 0330 de 2017, expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017), se desarrollan los cálculos referentes a la demanda hídrica que se presenta para este contexto municipal. Las demandas de agua para cada sector fueron determinadas con base en el título B. Las ecuaciones que son desarrolladas en este apartado fueron definidas en la metodología del segundo objetivo, específicamente en el numeral 12.4.2 “Determinación de demanda y generación de aguas residuales”

$$Q_D = \frac{0.85 * 27679\ hab * \frac{120\ L}{hab * día}}{86400} = \frac{32.68\ L}{s}$$

Ecuación 5. Caudal de aguas residuales domésticas
Fuente. Minvivienda, 2017

15.2.5.2 Caudal Comercial

Se calculó con base a la información acerca de establecimientos comerciales por parte del plan de desarrollo municipal, año 2016, y los consumos mínimos en comercios que establece el título B del RAS en su numeral 2.5.3.1.

Consumo mínimo en comercios				
Establecimiento	Cantidad	Área total m^2	Consumo $\frac{L}{m^2 * día}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Empresas	14	3500	20	0.810
Locales comerciales	538	26900	6	1.868
Mercados	8	1600	100	1.852
			Total	4.530

Tabla 37. Cálculo del caudal comercial

Fuente. Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

15.2.5.3 Caudal Institucional

15.2.5.3.1 Caudal Escolar

Se determinó con referencia a la información de cantidad de estudiantes por nivel suministrada por las instituciones educativas para el Plan de Desarrollo municipal vigente. Las dotaciones de uso escolar se especifican en el numeral 2.5.3.5 del título B del RAS.

Consumo escolar			
Establecimiento	Cantidad de alumnos	Consumo $\frac{L}{Alumno * jornada}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Preescolar	371	20	0.258
Primaria	2040	20	1.417
Educación media y superior	2598	25	2.255
		Total	3.930

Tabla 38. Cálculo del caudal escolar

Fuente. Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

15.2.5.3.2 Caudal sector salud y seguridad

El hospital San Rafael de Pacho cuenta con 56 camas de hospitalización, como está consolidado en el Plan Estratégico 2012-2015. El consumo de agua para este sector y el de seguridad es establecido según el numeral 2.5.3.6 del RAS.

Consumo institucional sector salud			
Instalación	Número de camas	Consumo $\frac{L}{\text{Cama} * \text{día}}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Hospital	56	800	0.519
		Total	0.519

Tabla 39. Cálculo consumo sector salud

Fuente: Autores con base al Plan Estratégico 2012 - 2015 del hospital San Rafael y título B del RAS, 2014.

Consumo institucional sector seguridad			
Instalación	Número de personas	Consumo $\frac{L}{\text{Persona} * \text{día}}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Estación de Policía	50	150	0.087
		Total	0.087

Tabla 40. Cálculo consumo sector seguridad

Fuente: Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

15.2.5.3.3 Caudal hoteles

El consumo en hoteles se calculó con base al numeral 2.5.3.6 del RAS, donde son establecidas las dotaciones en función del tipo de hotel y del clima. Pacho corresponde a un municipio no clasificado como altamente turístico, a un clima templado-frío y los hoteles se clasifican en categorías de 1 a 3 estrellas.

Consumo en hoteles				
Instalación	Cantidad	Número de cuartos	Consumo $\frac{L}{\text{Cuarto} * \text{día}}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Hotel	12	16	300	0.667
			Total	0.667

Tabla 41. Cálculo consumo en hoteles

Fuente: Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

15.2.5.4 Caudal Industrial

En Pacho existe la presencia de varias industrias, las cuales son enunciadas en el Plan de Desarrollo municipal. El cálculo de consumos se realizó con referencia al numeral 2.5.3.2 del RAS.

Consumo industrial			
Establecimiento	Número de trabajadores	Consumo $\frac{L}{Trabajador * jornada}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Fabricación equipo de elevación	50	100	0.174
Extracción de hulla	35	100	0.122
Comercializadora de flores	37	30	0.039
Fabricación electrodomésticos	15	30	0.016
		Total	0.349

Tabla 42. Cálculo consumo industrial

Fuente: Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

Consumo industrial tipo químico		
Establecimiento	Consumo $\frac{L}{Persona * día}$	Dotación $\frac{L}{s}$
Fabricación de pólvora	15	0.174
	Total	0.174

Tabla 43. Cálculo consumo industrial tipo químico

Fuente: Autores con base al Plan de Desarrollo Municipal, 2016 y título B del RAS, 2014.

15.2.6 Caudal medio diario

Calculadas las demandas de caudal de tipo doméstico, comercial, institucional e industrial, fue determinado Caudal medio diario (QMD) según lo dispuesto por el numeral 3.3.4 del título D del RAS, 2017.

$$Q_{MD} = \frac{32.68 L}{s} + \frac{4.53 L}{s} + \frac{5.2 L}{s} + \frac{0.52 L}{s} = \frac{42.93 L}{s}$$

Ecuación 6. Cálculo del Caudal medio diario (QMD)

Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017

15.2.7 Caudal máximo horario

15.2.7.1 Factor de mayoración

Se determinó a partir del Caudal medio diario y el factor de mayoración el cual fue calculado por medio de la ecuación de Gaines, la cual es aplicable para caudales comprendidos entre 0.28 y 4250 L/s según lo dispuesto en el título D del ras, numeral 3.3.5.1.

$$F = \frac{3.114}{\frac{42.93L}{s}^{0.062}} = 2.47$$

*Ecuación 7. Cálculo del factor de mayoración.
Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017*

Una vez calculado el factor de mayoración, se procedió a determinar el caudal máximo horario.

$$Q_{MH} = 2.46 * \frac{42.93L}{s} = \frac{105.88L}{s}$$

*Ecuación 8. Cálculo del Caudal máximo horario.
Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017*

15.2.8 Caudal de conexiones erradas

Según lo establecido en el PSMV municipal del año 2017, el casco urbano cuenta con 292.55 hectáreas de cobertura de alcantarillado y tomando en cuenta las áreas que son susceptibles a beneficiarse en un futuro con cobertura de red de alcantarillado, así como zonas de expansión fuera perímetro urbano identificadas por parte de la Administración Municipal, se determinó un área de perímetro sanitario proyectado que equivale a 498.76 hectáreas. Considerando que las obras de ampliación sobresalen del perímetro urbano, el cual corresponde a 360 hectáreas y que este no presenta una zona de expansión definida, información respaldada por la Secretaría de Planeación del Municipio de Pacho, se asume que para el tiempo de diseño la cobertura del perímetro sanitario y pluvial comprenderá la totalidad de la cabecera municipal. Teniendo en cuenta los parámetros establecidos por el título D del RAS en el numeral 3.3.3.5, para el nivel de complejidad medio-alto, el aporte de caudal por conexiones erradas corresponde a 0.1 L/s*Ha, de manera que este caudal se obtuvo de la siguiente forma.

$$Q_{CE} = 360 Ha * \frac{0.1L}{s * Ha} = \frac{36L}{s}$$

*Ecuación 9. Cálculo de caudal aportado por conexiones erradas
Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017*

15.2.9 Caudal por infiltración

En primer lugar, se estableció el tipo de infiltración que se presenta de modo de poderse clasificar dentro de los parámetros establecidos por el título D del RAS, numeral 3.3.3.6 de caudales de infiltración, donde se consigna la siguiente tabla.

Nivel de complejidad del sistema	Infiltración alta (L/s*ha)	Infiltración media (L/s*ha)	Infiltración baja (L/s*ha)
Bajo y Medio	0,3	0,2	0,1
Medio Alto y Alto	0,3	0,2	0,1

Tabla 44. Aportes por infiltración en redes de sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales
Fuente: título D del RAS, 2016

El PBOT vigente establece que, en su mayoría, el suelo del municipio posee una buena permeabilidad, variando entre rápida y moderada, debido a la predominancia de arenas y limos sobre las arcillas que representan un porcentaje inferior en comparación. Pacho cuenta con una precipitación media anual de alrededor de 1670 mm con una distribución temporal tipo bimodal, con dos periodos lluviosos comprendidos de abril a mayo y de septiembre a octubre, así como periodos secos de diciembre a marzo y de junio a agosto. Basándonos en la información suministrada por este documento se asume la capacidad de infiltración como media, correspondiendo a 0.2 L/s*ha. Al no tener la cabecera municipal zonas de expansión definidas, como fue explicado con anterioridad, y tomando en cuenta el perímetro urbano que equivale a 360 hectáreas, se obtiene siguiente cálculo.

$$Q_{INF} = 360 \text{ Ha} * \frac{0.2 \text{ L}}{\text{s} * \text{Ha}} = \frac{72 \text{ L}}{\text{s}}$$

Ecuación 10. Cálculo del caudal de infiltración
Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017

15.2.10 Caudal de Diseño

Se determina por medio de la sumatoria del Caudal medio horario (Qmh), Caudal de conexiones erradas (Qce) y Caudal de infiltración (Qinf).

$$Q_D = \frac{105.88 \text{ L}}{\text{s}} + \frac{36 \text{ L}}{\text{s}} + \frac{72 \text{ L}}{\text{s}} = \frac{213.88 \text{ L}}{\text{s}}$$

Ecuación 11. Cálculo del caudal de diseño
Fuente. Autores con base a Minvivienda, 2017

15.2.11 Modelación matemática de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Oxígeno Disuelto (OD)

15.2.11.1 Modelación Río Negro/Rute/San Antonio

Se obtuvo la modelación de la DBO5 existente en el afluente receptor después de cada descarga de vertimiento usando la metodología de Streeter-Phelps como se describió anteriormente en la sección de metodología. En total se modelaron los 6 vertimientos priorizados del casco urbano de Pacho, de los cuales 4 descargan a lo largo del río Rute, con los dos restantes sobre el río Batán, así como el Oxígeno Disuelto a lo largo de estos cauces para su comparación con los valores límites establecidos de DBO5 en los objetivos de calidad clase 2 y 4 para la cuenca del río Negro (20 mg/L y 50 mg/L respectivamente) con el PSMV de Pacho, 2018 y así tener una idea del estado de salud actual de estos cuerpos superficiales consecuencia del aporte de Aguas Residuales. Estas clasificaciones son otorgadas por el mismo decreto que asigna los parámetros a cumplir en los objetivos de calidad.

A continuación, se presentan los resultados del desarrollo del modelo y sus graficas correspondientes para ambas fuentes hídricas que reciben los vertimientos (río Negro y río Batán), cada fila sombreada de amarillo se refiere a un punto en donde se realiza un vertimiento, sin embargo, el sombreado rojo indica la confluencia del río Batan al río Negro, también se resalta que se tomó como longitud del río dentro de la cabecera municipal un valor de 3.4 Km obteniendo este valor del software ArcGis y capas del municipio.

	X (Km)	X(m)	Lc (mg/L)	Dc (mg/L)	Dn (mg/L)	Dt (mg/L)	OD (mg/L)	
0	3.4	3400	4.7	1.5	0.0	1.5	7.69	
100	3.3	3300	9.0	1.5	0.0	1.5	7.6	V1 (m/s)
200	3.2	3200	8.8	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
300	3.1	3100	8.7	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
400	3.0	3000	8.5	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
500	2.9	2900	8.3	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
600	2.8	2800	8.2	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
700	2.7	2700	8.0	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
800	2.6	2600	7.9	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
900	2.5	2500	7.7	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1000	2.4	2400	7.6	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1100	2.3	2300	7.4	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1200	2.2	2200	7.3	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1300	2.1	2100	7.1	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1400	2.0	2000	7.0	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1500	1.9	1900	6.9	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1600	1.8	1800	6.7	1.6	0.0	1.6	7.6	10774.7
1700	1.7	1700	6.6	1.5	0.0	1.5	7.6	10774.7
1800	1.6	1600	17.5	1.8	0.0	1.8	7.4	V2 (m/s)
1900	1.5	1500	17.2	1.8	0.0	1.8	7.4	11176.7
2000	1.4	1400	16.9	1.9	0.0	1.9	7.3	11176.7
2100	1.3	1300	16.6	1.9	0.0	1.9	7.3	11176.7
2200	1.2	1200	16.3	1.9	0.0	1.9	7.2	11176.7
2300	1.1	1100	16.1	2.0	0.0	2.0	7.2	11176.7
2400	1.0	1000	15.8	2.0	0.0	2.0	7.2	11176.7
2500	0.9	900	15.5	2.0	0.0	2.0	7.2	11176.7
2600	0.8	800	15.2	2.0	0.0	2.0	7.1	11176.7
2700	0.7	700	15.0	2.1	0.0	2.1	7.1	11176.7
2800	0.6	600	14.7	2.1	0.0	2.1	7.1	11176.7
2900	0.5	500	14.5	2.1	0.0	2.1	7.1	11176.7
3000	0.4	400	14.1	2.1	0.0	2.1	7.1	V3 (m/s)
3100	0.3	300	13.9	2.3	0.0	2.3	6.9	12385.5
3200	0.2	200	16.0	2.3	0.0	2.3	6.8	V4 (m/s)
3300	0.1	100	15.8	2.4	0.0	2.4	6.8	12481.2
3400	0	0	15.5	2.4	0.0	2.4	6.8	12481.2

Tabla 45. Resultado del desarrollo de la modelación Río Negro/Rute/San Antonio
Fuente. Autores con base en Chapra, 2008

A partir de la tabla anterior, se destaca como una vez el cuerpo hídrico recibe un vertimiento este presenta un pico considerable y evidenciable en el cual sus características fisicoquímicas son alteras. Se evidencia igualmente como el rio es capaz de pasado el tiempo y distancia ir recuperando sus características fisicoquímicas, sin embargo, es observable en la siguiente figura cómo el número de vertimientos presentes hace que estos cambios nunca se lleguen a remediar por parte del río por sí solo. Es importante resaltar que los datos de estos cálculos fueron tomados durante temporada de lluvias regulares y la concentración de DBO5 y OD están directamente relacionadas con la altura de lámina de agua y su velocidad como se evidencia en las ecuaciones expuestas en la metodología de modelación, por lo tanto, en temporada seca esta concentración tendera a subir e incluso sobrepasar significativamente el umbral normativo.

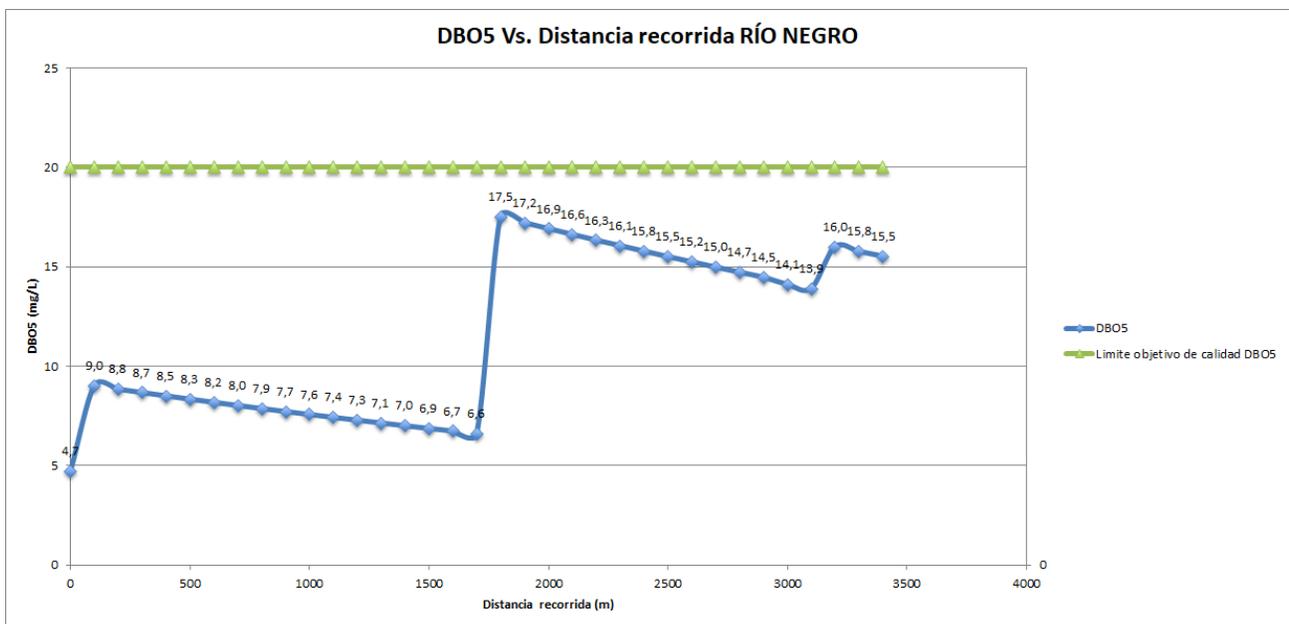


Figura 13. Modelación de DBO5 a lo largo del río Negro
Fuente. Autores

Con respecto al Oxígeno disuelto, se pudo observar en la siguiente figura como los vertimientos tienen un efecto diminutivo en este, teniendo en cuenta que a mayor concentración de DBO5 habrá un mayor consumo de oxígeno presente en el agua, aunque si bien es cierto que se encuentra bastante por encima del límite inferior del objetivo de calidad para el año 2020 propuesto por la CAR en el año 2009, este no se puede perder de vista ya que se aprecia una disminución constante que en caso de encontrar más vertimientos posteriores a los que se tienen en cuenta en este documento, se puede incluso llegar a ver el oxígeno disuelto por debajo de este límite inferior.

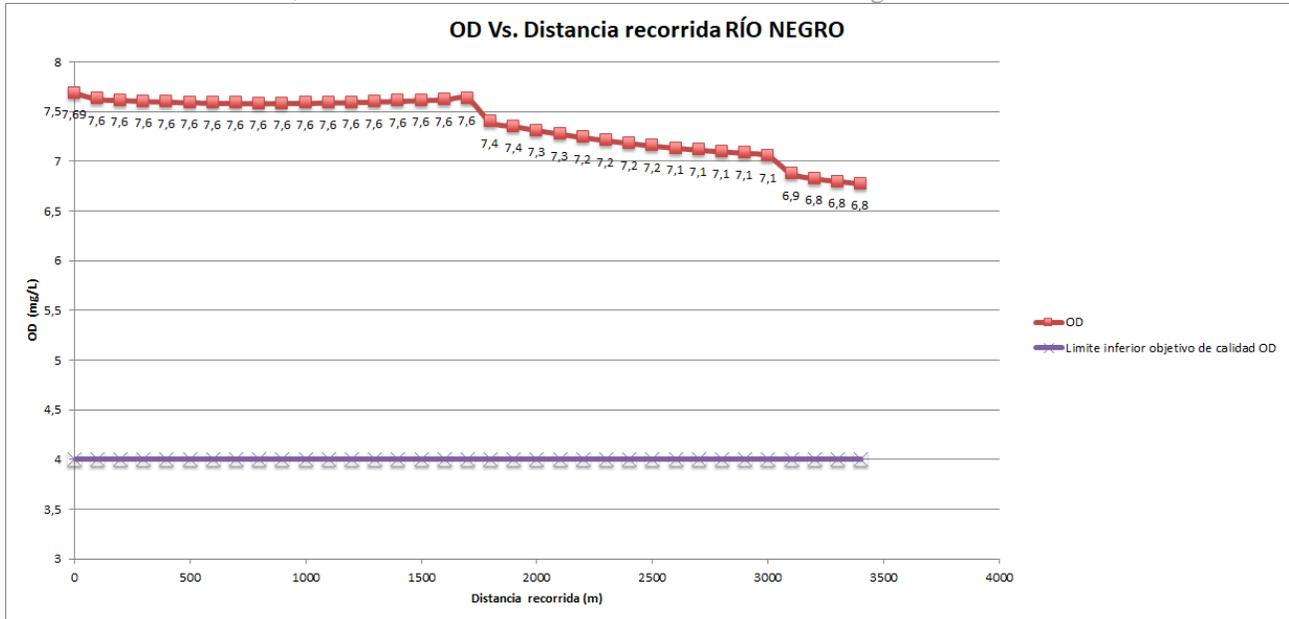


Figura 14. Modelación de OD a lo largo del río Negro
Fuente. Autores

15.2.11.2 Modelación Río Batán

Para el río Batán se realizó el mismo desarrollo metodológico para obtener su modelación de DBO5 y OD, por lo que se evidencian las filas resaltadas como vertimientos puntuales realizados a este cuerpo de agua y posteriormente su respectiva gráfica.

	X (Km)	X(m)	Lc (mg/L)	Dc (mg/L)	Dn (mg/L)	Dt (mg/L)	OD (mg/L)	
0	0.75	750.00	5.10	1.47	0.00	1.47	7.50	
50	0.70	700.00	4.67	1.34	0.00	1.34	7.62	1152
100	0.65	650.00	28.43	1.58	0.00	1.58	7.39	V1 (m/s)
150	0.60	600.00	26.13	2.01	0.00	2.01	6.96	1201.1616
200	0.55	550.00	27.40	2.04	0.00	2.04	6.93	V2 (m/s)
250	0.50	500.00	25.19	2.38	0.00	2.38	6.59	1208.8512
300	0.45	450.00	23.16	2.60	0.00	2.60	6.37	1208.8512
350	0.40	400.00	21.30	2.73	0.00	2.73	6.24	1208.8512
400	0.35	350.00	19.58	2.78	0.00	2.78	6.19	1208.8512
450	0.30	300.00	18.00	2.78	0.00	2.78	6.19	1208.8512
500	0.25	250.00	16.55	2.73	0.00	2.73	6.24	1208.8512
550	0.20	200.00	15.22	2.65	0.00	2.65	6.31	1208.8512
600	0.15	150.00	13.99	2.55	0.00	2.55	6.42	1208.8512
650	0.10	100.00	12.87	2.44	0.00	2.44	6.53	1208.8512
700	0.05	50.00	11.83	2.31	0.00	2.31	6.66	1208.8512
750	0.00	0.00	10.88	2.18	0.00	2.18	6.79	1208.8512

Tabla 46. Resultado del desarrollo de la modelación Río Batán
Fuente. Autores con base en Chapra, 2008

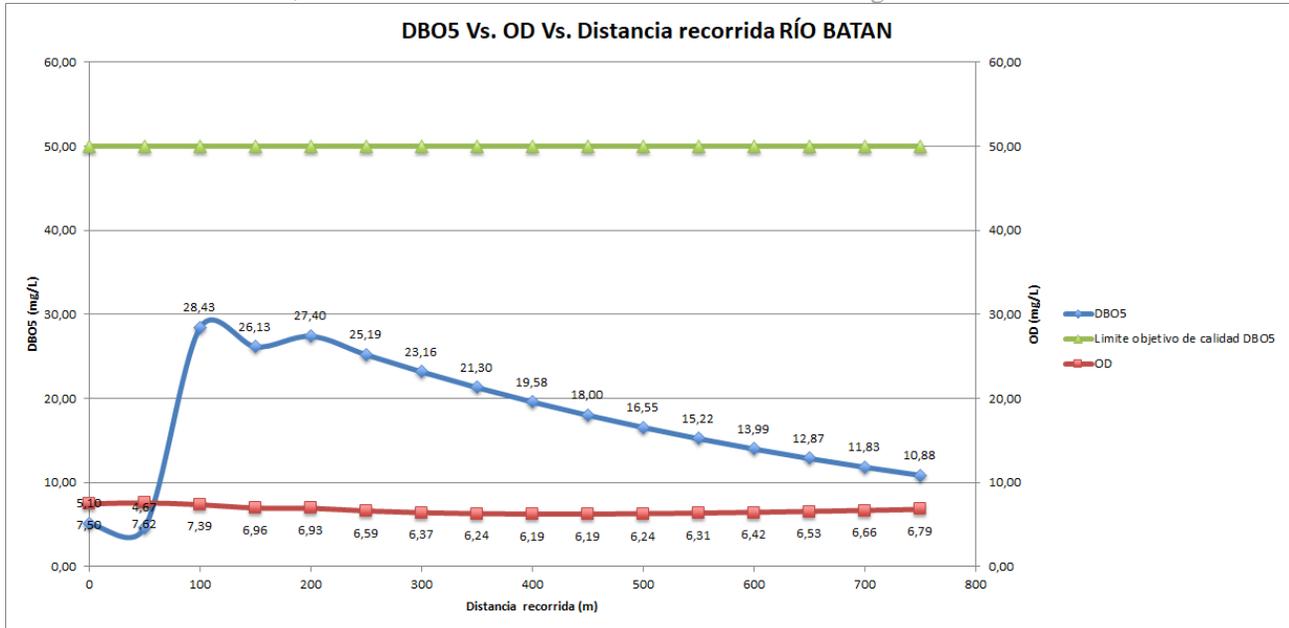


Figura 15. Modelación de DBO y OD a lo largo del río Batán
Fuente. Autores

Si bien actualmente el río Rute está por debajo de los valores límites de DBO establecidos por los objetivos de calidad hasta el año 2020 para la cuenca del río Negro Clase II y IV (20 mg/L y 50 mg/L), existe un tramo alrededor de la mitad de su recorrido a lo largo del casco urbano donde existe una acelerada subida de esta variable fisicoquímica, lugar en donde en los años futuros se presentará un acercamiento a los valores límites que ralentizará los procesos de depuración de la carga contaminante natural de este cuerpo superficial, degradando notablemente la calidad del recurso al cual los pobladores tendrán acceso. Es también de importancia el decaimiento que experimenta el Oxígeno Disuelto (OD) hacia el final del recorrido del río Rute, demostrando el impacto sobre la calidad del agua.

Lo anteriormente afirmado se sustenta también por lo demostrado en la modelación para el río Batán, en donde se apreció que la DBO en las distancias iniciales muestra un preocupante aumento que se acerca a los valores límites establecidos, llegando incluso en un punto a rozar los 30 mg/l de DBO, es claro por medio de la modelación que si bien estos cuerpos hídricos tienen unos buenos procesos de depuración, en algunos tramos existen concentraciones que se acercan a los valores límites establecidos.

Es bastante probable que en el periodo de diseño de la PTAR se alcancen e incluso se superen los límites de los objetivos de calidad para la cuenca alta del río Negro.

15.2.12 Posibles afectaciones en consecuencia de los vertimientos

Teniendo en cuenta las concentraciones de DBO5 encontradas en los vertimientos, los organismos aerobios, que se encargan de degradar esta materia orgánica presente en los vertimientos generan a través de este proceso una reducción del oxígeno, esto a su vez conlleva algunas consecuencias como lo son la pérdida de un hábitat favorable para el desarrollo de peces, de los cuales las poblaciones aledañas dependen para su sustento alimenticio y/o económico. Así mismo, un aumento en la concentración de DBO5 puede conllevar a un aumento en población bacteriana que a su vez puede acarrear un aumento en los problemas de salud de la población que utilice este recurso hídrico (IDEAM, 2010). En el caso de Pacho, los cuerpos de agua determinaron los patrones de asentamiento de la población a lo largo del tiempo, ya que se puede ver como estos se realizaron a lo largo de las rondas de los ríos Rute y Batán, haciendo más probable que la población esté en contacto con el recurso hídrico contaminado por medio de su uso para diferentes actividades, ya sean de tipo domésticas, agropecuarias, comerciales o industriales. Esta agua está siendo utilizada por los agricultores de la zona rural de Pacho, que siendo una de las actividades predominantes en el municipio, conllevando a un incremento en el riesgo asociado con enfermedades por contaminación hídrica en la población.

15.2.13 Proyección de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

A continuación, se calcula el cambio que experimentará la DBO5 y los Sólidos Suspendidos Totales, determinando las variaciones que sufrirán estas variables a futuro consecuencia del crecimiento demográfico y, por consiguiente, del aumento de las descargas de vertimientos sobre los cuerpos superficiales en Pacho. Para ello, se tomará en cuenta los aportes per cápita de Aguas Residuales Domésticas sugeridos RAS, año 2017, en relación con las poblaciones futuras por cada uno de los tres quinquenios inmediatamente posteriores, así como con la población proyectada al tiempo de diseño. Para la selección de un Sistema de Tratamiento que esté en la capacidad para proveer a la Planta de la depuración de cargas contaminantes suficientes a lo largo del tiempo, se hace necesario establecer las mayores cargas de las cuales la PTAR propuesta podría llegar a alimentarse como afluente, cargas que, al estar en función del aporte per cápita, corresponden a las proyecciones para el tiempo de diseño establecido (año 2044). Se busca conocer la concentración de los parámetros de calidad criterio (DBO5 y SST) al periodo de diseño El Aporte Per Cápita de aguas residuales tanto de DBO5 como SST, fue tomado como el valor sugerido de 50g/hab*d consolidado el artículo 169. Línea base de caracterización del agua residual cruda, parágrafo 2 de la Resolución 0330 de 2017.

PROYECCIONES DE CARGA		
DATOS DE PARTIDA		
	Población total 2019	16463
	Tasa de crecimiento poblacional (%)	2.7
	Aporte Per Cápita DBO5 (g/hab*d)	50
	Aporte Per Cápita SST (g/hab*d)	50
	Dotación (L/hab*d)	120
	Coefficiente de retorno	0.85
	Factor de conversión (día a seg)	1.15741E-05
PROYECCIÓN DE CARGAS QUINQUENIOS		
2024	Población	18686
	Carga DBO5 (ton/año)	341.01
	Carga SST (ton/año)	341.01
2029	Población	20908
	Carga DBO5 (ton/año)	381.57
	Carga SST (ton/año)	381.57
2034	Población	23131
	Carga DBO5 (ton/año)	422.13
	Carga SST (ton/año)	422.13
PROYECCIONES AL TIEMPO DE DISEÑO		
2044	Población	27679
	Carga DBO5 (ton/año)	505.14
	Carga SST (ton/año)	505.14
	Vol ARG (L/s)	38.44
	Concentración DBO5 (mg/L)	416.7
	Concentración SST (mg/L)	416.7

Tabla 47. Proyecciones de carga/Datos de partida.
Fuente. Autores

15.2.14 Comparación de las descargas de vertimientos puntuales con los valores máximos permisibles de la Resolución 631 de 2015

Tomando en cuenta los parámetros de calidad criterio (DBO5 y SST) para cada uno de los puntos de vertimientos priorizados, los cuales fueron calculados a partir de las cargas de toneladas por año de estas variables, consolidadas en el PSMV del año 2017, se realizó un análisis para conocer el estado de salud de los ríos Rute y Batán en la actualidad, a través de la comparación con los valores máximos permisibles de la resolución 631 de 2015 para este tipo de aguas residuales, que corresponde a 90 mg/L para DBO5 y SST.

COMPARACIÓN VERTIMIENTOS CON RES 631/2015			
DATOS DE PARTIDA (PSMV)			
Vertimiento priorizado	Ton DBO5/año	Ton SST/año	
1	51.5	53.9	
2	1.9	0.9	
3	31.5	11.1	
5	98	100.5	
6	38.3	13.1	
10	30.1	19.8	

Vertimientos Priorizados	DBO5 (mg/L)	SST (mg/L)	RES 631
1	396.2762162	414.7	90
2	225.6502051	106.9	90
3	585.1543336	206.2	90
5	289.3573852	296.6	90
6	377.8733768	129.2	90
10	287.316297	189.0	90

Tabla 48. Comparación de los vertimientos puntuales con la Resolución 631 de 2015
Fuente. Autores con base en Resolución 631 de 2015 de Minambiente

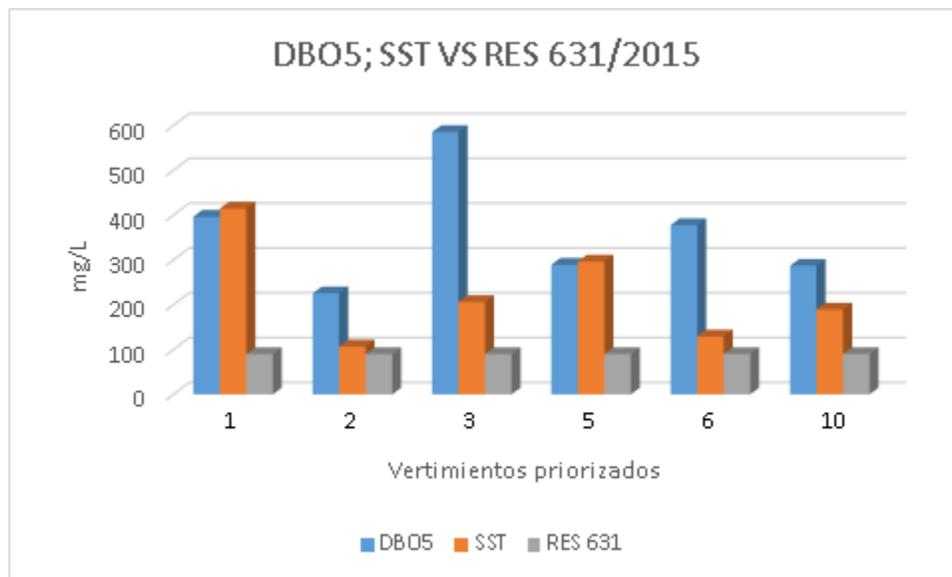


Figura 16. Comparación de la concentración en puntos de vertimiento priorizados con Res 631/2015 (año 2018)

Fuente. Autores con base en Resolución 631 de 2015 de Minambiente

Se observó que mediante este gráfico de comparación con la normatividad vigente que los puntos priorizados uno y tres de vertimientos presentan un estado crítico, demostrando que en la actualidad este municipio demanda una PTAR, ya que ninguno de estos puntos cumple ni siquiera con el valor límite máximo permisible. De no realizarse un sistema de tratamiento eficaz para estas descargas, se está poniendo en alto riesgo no solo a estos cuerpos hídricos sino también a las comunidades, organismos vivos y a los servicios ambientales que dependen de un recurso hídrico de calidad por parte de estos afluentes, ya que los vertimientos de materia orgánica biodegradable que son expresados como DBO (los más representativos dentro de la DQO con base al análisis realizado anteriormente), al degradarse por acción de organismos aerobios, generan una disminución del oxígeno existente en los cuerpos de agua, afectando el desarrollo de los diferentes componentes biológicos de estos sistemas hídricos e imposibilitando la subsistencia de especies deseables tales como peces, componentes importantes para el comercio y la alimentación. Asimismo, el incremento de esta variable trae consigo un aumento en la carga bacteriana que a su vez se traduce en un aumento de organismos patógenos, poniendo en riesgo la salud de las comunidades aledañas que se surten de estas aguas, ya sea para su uso o consumo directo o indirecto. En cuanto a los Sólidos Suspendidos Totales, su presencia en estos afluentes se correlaciona con el aumento en el color y la turbiedad, como también con la presencia de materia orgánica e inorgánica, viéndose los SST relacionados indirectamente con el aumento en el consumo del oxígeno existente en el agua, esto último viéndose representado de manera gráfica donde se evidencia que a medida que la concentración de SST aumenta, también a su vez lo hace la de DBO5. También, los Sólidos Suspendidos Totales adsorben nutrientes, contaminantes persistentes, bioacumulables y tóxicos que disminuyen notablemente la calidad de los servicios ambientales que están en capacidad de ofrecer los ecosistemas lóticos tales como provisión de agua, alimento, biodiversidad o belleza escénica. (IDEAM, 2010). Este gráfico es contundente y justifica la ejecución de una PTAR, de modo que se puedan cumplir los objetivos de calidad trazados para la cuenca del Río Negro para el año 2020, así como la normativa ambiental vigente.

15.2.15 Relación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

A manera de conocer el factor de biodegradabilidad presente en los vertimientos, fue necesario determinar la relación de la Demanda Química de Oxígeno con la Demanda Biológica de Oxígeno que nos permitiese determinar qué tipos de tratamiento se tomarían en cuenta en función del resultado de esta, donde al ser este factor menor que 2.5, significa una predominancia del aporte orgánico dentro de la DQO

Relación entre la DQO y la DBO5						
Parámetro	Vert 1	Vert 2	Vert 3	Vert 5	Vert 6	Vert 10
DQO	43.5	250.6	615.7	669.8	407	564.1
DBO5	36.2	231.5	592.6	293.5	383.2	291.1
DQO/DBO5	1.20	1.08	1.04	2.28	1.06	1.94

*Tabla 49. Fracción de DBO5 con respecto a la DQO en puntos de vertimientos priorizados
Fuente. Autores con base en Alvares-Vázquez, H., Jefferson, B., & Judd, S. J. (2004).*

Debido a los resultados de cálculo de cada fracción, siendo estos menores a 2.5, se determinó que la materia orgánica biodegradable de los vertimientos es la cantidad más representativa dentro de la DQO en los diferentes puntos de descarga. Era previsible una predominancia de materia orgánica ya que en este municipio los vertimientos de tipo doméstico y agrícola son los más representativos, siendo esto consistente con la información consultada acerca de las actividades predominantes de Pacho. Por lo anterior fue determinado que los procesos biológicos de tratamiento son la opción más apropiada para el contexto que se presenta.

15.3 Resultados tercer objetivo

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos del desarrollo de la metodología expuesta en el capítulo de metodología. Se evidenciaron cada uno de los elementos de: Selección de un sistema de tratamiento adecuado para el municipio, la calidad del recurso hídrico tratado, aspectos de espacio físico en donde se propone la ubicación de la planta como zonas de riesgo y aspectos bióticos presentes, siguiendo con evaluaciones de tres distintas alternativas de tratamiento y culminando con la selección de la mejor opción y su diseño.

15.3.1 Selección de un Sistema de Tratamiento apropiado para el contexto municipal

Dentro de este capítulo se presentaron los aspectos a tener en cuenta al momento de la selección de un sistema de tratamiento de aguas residuales apropiado para el sitio propuesto.

15.3.1.1 Composición de las Aguas Residuales Municipales

La composición de las Aguas Residuales crudas de los afluentes principales de Pacho (río Rute y Batán) es uno de los aspectos a tener en cuenta para la selección de una PTARM, tal como se menciona en la metodología elaborada por *Miranda, Ubaque, & Pinzón (2015)*, En su artículo para la Revista Tecnura “*Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*” el autor expone la importancia de clasificar las concentraciones de contaminantes criterio, debido que por medio de esto se determinará el grado de tratamiento, la tecnología, así como la eficiencia requerida para alcanzar el cumplimiento normativo. A continuación, se muestra la concentración típica que presentan las aguas residuales crudas municipales con su respectiva clasificación en función de las concentraciones de contaminantes presentes en las aguas.

Tabla 1. Composición típica de aguas residuales crudas

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACIÓN*			CONCENTRACIÓN**			CONCENTRACIÓN***		
		FUERTE	MEDIA	DÉBIL	CRUDA	SEDIMENTADA	TRATADA BIOLÓGICAMENTE	FUERTE	MEDIA	LIGERA
Sólidos totales (ST)	mg/L	1200	720	350	800	680	530	1000	500	200
SDT	mg/L	850	500	250				500	200	100
SST	mg/L	350	220	100	240	120	30	500	200	100
Sólidos sedimentables (SS)	mg/L	20	10	5				250	180	40
DBO ₅	mg/L	400	220	110	200	130	30	300	200	100
COI	mg/L	290	160	80						
DQO	mg/L	1000	500	250				800	450	160
N Total	mg/L	85	40	20	35	25	20	86	50	25
N NH ₄	mg/L	50	25	12				50	30	15
N NO ₂	mg/L	0	0	0				0,1	0,05	0,001
N NO ₃	mg/L	0	0	0				0,4	0,2	0,1
N org.	mg/L	35	15	8				35	20	10
P total	mg/L	20	10	6	10	8	7	17	7	2
P org.	mg/L	5	3	1						
P inorg.	mg/L	10	5	3	7	7	7			
Sulfatos	mg/L	50	30	20						
Cloruros	mg/L	100	50	30				175	100	15
Grasas y aceites	mg/L	150	100	50				40	20	5
Alcalinidad total	mg/L	200	100	50						
CCVs	mg/L	400	400-100	100						
Coliformes totales	NMP/100 mL	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁶ -10 ⁷						

Fuente:
*Tomado de Metcalf & Eddy (2001)
**Tomado de Hammer (1971)
***Tomado de Hernández (1996)

Tabla 50. Clasificación de aguas residuales crudas.

Fuente. Miranda, Ubaque, & Pinzón, 2015, con base en los autores citados

Teniendo en cuenta la clasificación de Metcalf & Eddy que se presenta en la tabla anterior, se clasifican las aguas residuales crudas presentes mediante los criterios establecidos por los autores. Se tomará en cuenta la composición de las aguas para el año 2044 (periodo de diseño de la Planta), debido a que el sistema de tratamiento escogido debe estar en capacidad para depurar las diferentes cargas contaminantes existentes a lo largo del periodo de tiempo comprendido.

Clasificación aguas residuales crudas (año 2044)			
Parámetro	Unidad	Concentración	Clasificación Metcalf & Eddy (2001)
DBO5	mg/L	416.7	FUERTE
SST	mg/L	416.7	FUERTE

Tabla 51. Clasificación de aguas residuales cruda año 2044

Fuente. Elaboración propia, con base en los autores citados

15.3.1.2 Eficiencias de remoción de Contaminantes por tecnologías

La tecnología para una PTAR depende de las eficiencias de remoción que se quieran obtener, según los parámetros del agua residual cruda que se tienen para el periodo de diseño determinado y tomando como referencia la normativa ambiental vigente que debe cumplirse. En la siguiente tabla presentada por el RAS de año 2017, se observan diferentes eficiencias en la remoción de contaminantes por tecnologías de tratamiento.

	Unidades de tratamiento	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes (%)						Observaciones
		DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	
Pre-tratamiento	Cribado o desbaste	0-15	0-10	10-50	0-6	0-40	N/A	Remociones con miltamices y microcribas
	Desarenadores	0-5	0-5	0-10	N/A	N/A	N/A	
	Trampa de grasas	0-5	0-3	10-15	N/A	85-95	N/A	
Tratamiento Primario	Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	75-85	60-70	30-50	
	Lagunas anaerobias	50-70	30-50	50-60	75-85	80-90	80-90	
	Tanque Imhoff	25-40	15-30	50-70	75-85	60-70	-30-50	
Tratamiento Secundario	Reactor UASB (RAFA)	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Lagunas facultativas	80-90	40-50	63-75	75-85	70-90	80-90	Sin contar con algas
	Lagunas aireadas	80-95	60-70	N/A	N/A	N/A	80-90	Con sedimentación secundaria
	Reactor anaerobio RAP	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Lodos activados (convencionales)	80-95	70-80	80-90	N/A	N/A	80-90	
	Filtros percoladores De alta tasa, roca	65-90	55-70	60-85	N/A	N/A	80-90	
De alta tasa, plástico	75-95	60-80	65-85	N/A	N/A	80-90		

Tabla 52. Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías.

Fuente. Minambiente RAS, 2017

Se evaluó cuáles tecnologías están en la capacidad de depurar las cargas contaminantes que se toman en cuenta (año 2044) para alcanzar el cumplimiento normativo. Por medio del diseño de las tecnologías que fueron seleccionadas se calculó su eficiencia de remoción de cargas para este caso puntual, las demás eficiencias corresponden a sus valores teóricos en la literatura.

Eficiencias de tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales						
Parámetro de calidad	Concentración pre-tratamiento (mg/L)	Tipo de tratamiento	Tratamiento Seleccionado	Eficiencia de remoción (%)	Concentración post-tratamiento (mg/L)	
Primera alternativa	DBO5	416.7	Pretratamiento	Cribado	15	354.20
		354.20	Pretratamiento	Trampa de grasas	5	336.49
		336.49	Tratamiento Primario	Sedimentador primario	34.61	220.03
		220.03	Tratamiento Secundario	RAFA	75	55.01
		55.01	Tratamiento secundario	FAFA	64.48	19.54
	SST	416.70	Pretratamiento	Cribado	30	291.69
		291.69	Pretratamiento	Trampa de grasas	10	262.52
		262.52	Tratamiento Primario	Sedimentador primario	56.48	114.25
		114.25	Tratamiento Secundario	RAFA	70	34.27
		34.27	Tratamiento Secundario	FAFA	65	12.00
Segunda alternativa	DBO5	416.70	Pretratamiento	Cribado	15	354.20
		354.20	Pretratamiento	Trampa de grasas	5	336.49
		336.49	Tratamiento Primario	Sedimentador primario	34.61	220.03
		220.03	Tratamiento Secundario	FAFA	64.48	78.15
		78.15	Tratamiento Secundario	Zanja de Oxidación	80	15.63
	SST	416.70	Pretratamiento	Cribado	30	291.69
		291.69	Pretratamiento	Trampa de grasas	10	262.52
		262.52	Tratamiento Primario	Sedimentador primario	56.48	114.25
		114.25	Tratamiento Secundario	FAFA	65	39.99
		39.99	Tratamiento Secundario	Zanja de Oxidación	80	8.00

*Tabla 53. Eficiencias de alternativas 1 y 2 de tratamiento
Fuente: Autores con base en el RAS, 2017*

Tercera alternativa	DBO5	416.70	Pretratamiento	Cribado	15	354.20
		354.20	Pretratamiento	Trampa de grasas	5	336.49
		336.49	Tratamiento primario	Sedimentador primario	34.61	220.03
		220.03	Tratamiento Secundario	Lodos activados (convencionales)	95	11.00
	SST	416.70	Pretratamiento	Cribado	50	208.35
		208.35	Tratamiento Primario	Trampa de grasas	10	187.52
		187.52	Tratamiento Secundario	Sedimentador primario	56.48	81.61
		81.61	Tratamiento Secundario	Lodos activados (convencionales)	85	12.24

*Tabla 54. Eficiencias de alternativa 3 de tratamiento
Fuente. Autores con base en el RAS, 2017*

15.3.2 Calidad del agua residual tratada

La calidad del recurso hídrico que corresponde al efluente de una PTAR debe contar con unos criterios de calidad lo suficientemente óptimos para justificar como tal la ejecución de este tipo de proyectos, de modo que sea viable la descarga de este vertimiento tratado a los cuerpos de agua receptores, en armonía con la normativa de vertimientos que aplica para el agua residual tratada. A continuación, se puede observar diferentes parámetros de calidad establecidos para el agua residual tratada, por parte de normativa nacional, a nivel de Distrito Capital e internacional para su comparación a diferentes niveles.

Parámetro	Unidad	Acuerdo 043 de 2006	Resolución 3461 de 2009	Resolución 631 de 2015	Resolución 3956 de 2009	Decreto Supremo 003-2010 MINAM
		Río Bogotá	Río Negro	Vertimientos	SDA	Perú - Promedio
SST	mg/L	40	2000	90	Remoción >80%	150
DBO5	mg/L	50	50	90	Remoción >80%	100

*Tabla 55. Criterios de Calidad del agua residual tratada
Fuente. Autores con base en Miranda, Ubaque, & Pinzón (2015)*

Relacionando las eficiencias de remoción de los tratamientos planteados (Véase tablas 53 y 54) y los criterios de calidad a cumplir en el agua residual tratada de la tabla anterior, es evidenciable que estas tecnologías poseen la capacidad suficiente para verter un efluente con una buena calidad del agua, que cumpla satisfactoria y ampliamente con la normativa vigente (Resolución 631 de 2015), encontrándose apta para el uso agrícola con restricciones, pecuario e industrial, rigiéndose en lo expuesto en el artículo segundo de la clasificación de los usos del agua para la Cuenca del río Negro por medio de los valores existentes de los parámetros de calidad, Resolución 3461 de 2009, donde se establece que los valores de la clase IV corresponden a los de un recurso hídrico apto para su uso en este tipo de actividades. Las restricciones de uso en actividades agrícolas corresponden a que el Número más probable (NMP) de

coliformes totales no debe exceder de 5000 cuando el agua se use para riego de frutas que se consumen frecuentemente sin retirar su cáscara, así como hortalizas de tallo corto. Además, el NMP de coliformes fecales no deberá exceder de 1000 cuando este recurso se utilice para el mismo fin anterior. De igual manera, es observable que las eficiencias de remoción calculadas también cumplen con los demás valores restrictivos que corresponden a las diferentes normativas mencionadas en la tabla 55.

15.3.3 Aspectos de Localización de la Planta

Es fundamental tener claro la ubicación de ecosistemas críticos y zonas recreativas, de modo que el sitio escogido para la Planta esté lo más alejado posible. También, debe ser un lugar que esté libre de amenazas por deslizamientos, inestabilidad geológica o inundaciones. Los vientos del punto escogido no deben tener tendencia a desplazarse hacia la población, en general, las PTAR idealmente deben ubicarse a más de un kilómetro de los asentamientos, la distancia mínima a las residencias es de 200 metros, a menos que un estudio de impacto ambiental determine la ocurrencia de efectos no deseados consecuencia de la instalación (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000). Se propone el espacio destinado por el PSMV municipal del año 2017 para la construcción de la Planta, de manera que se evaluará el predio a los diferentes niveles para generar un concepto. Para este caso, las descargas de aguas residuales tratadas se plantean realizar a un cuerpo superficial de flujo permanente cercano, el río Rute. El predio está ubicado en las coordenadas Norte: 1061322 Este: 990397 con una altura de 1645 m.s.n.m., ubicado en la vereda Compera. Es observable en la siguiente figura 17. tomada del mismo PSMV 2017.



*Figura 17. Ubicación destinada para la PTAR del municipio.
Fuente. Empresas Públicas de Cundinamarca – PSMV, 2017*

15.3.3.1 Ubicación de la Planta

A partir de las coordenadas suministradas por el PSMV, haciendo uso del Sistema de Información Geográfica ArcGIS se determinó la distancia existente entre el límite de los asentamientos existentes y la ubicación planteada. Como se evidencia en la siguiente captura de pantalla, la ubicación se encuentra a más de un kilómetro de la población, como es recomendable.

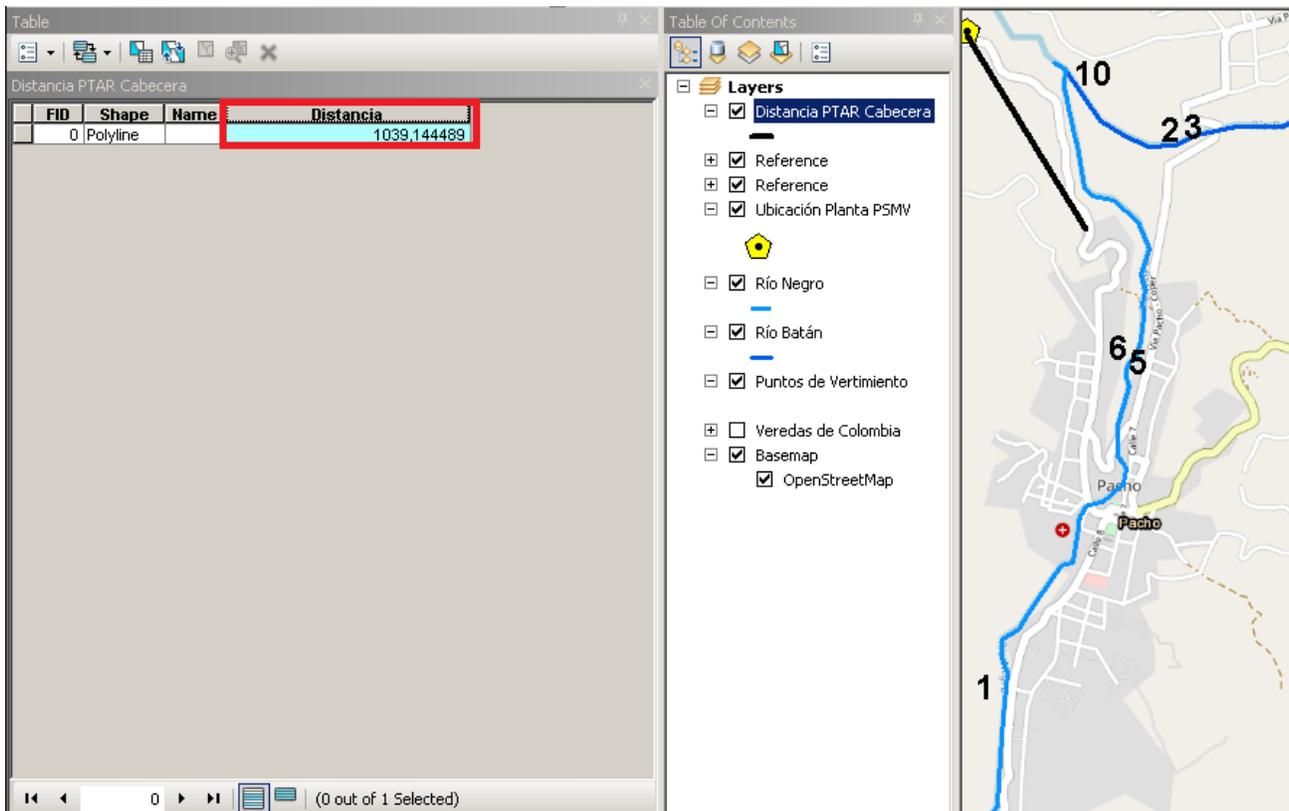


Figura 18. Evidencia de distancia entre ubicación planteada y asentamientos
Fuente. Autores haciendo uso del software ArcGIS

15.3.3.2 Pendiente del terreno

Se obtuvo valiéndose del software libre Google Earth Pro, con base a la información de los perfiles altitudinales aportados por el programa, así como de distancias. Por medio del mismo se determinó igualmente el área del predio en posesión de la administración municipal para la construcción de la planta.



Figura 19. Inclinación media del terreno
Fuente. Autores haciendo uso del software Google Earth Pro

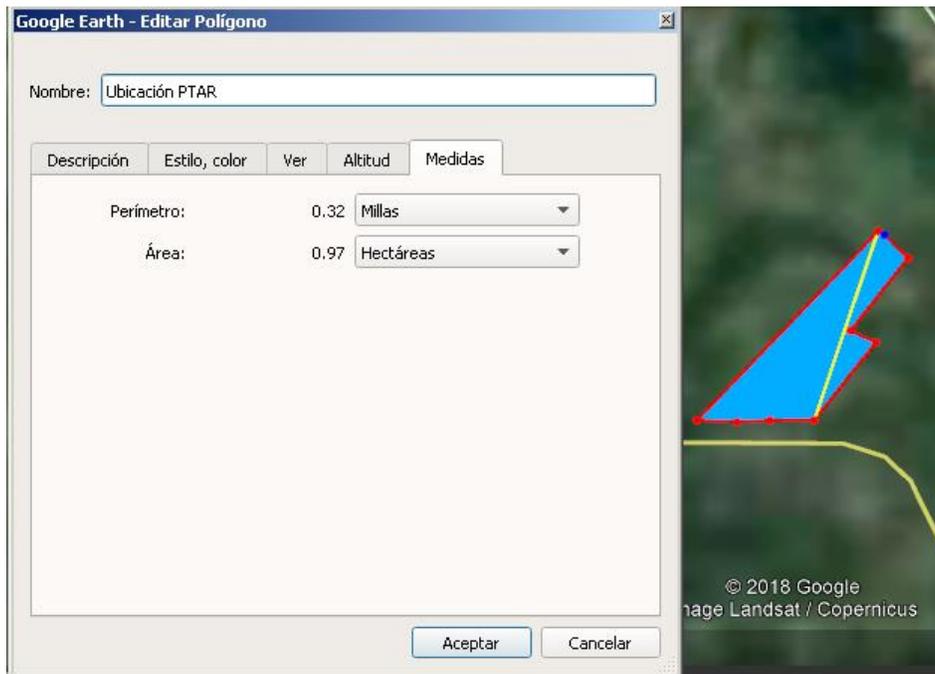


Figura 20. Área del predio destinado para la Planta
Fuente. Autores haciendo uso del software Google Earth Pro

Como se evidenció mediante las mediciones ejecutadas, el predio tiene un área de poco menos de una hectárea, por lo cual tratamientos que exigen grandes cantidades de terreno tales como el lagunaje fueron descartados, y en su lugar se tomaron en cuenta alternativas de tratamiento que demanden poco espacio para garantizar su viabilidad.

15.3.3.3 Zonas de Riesgo

En el plano de amenazas y riesgos del municipio, figura 21, se pudo evidenciar que tanto la parte oriental como central-occidental del casco urbano principalmente, padece de un alto riesgo por inundaciones, por cuenta de los afluentes que cruzan dichas zonas de manera transversal (Río San Antonio y Quebrada Gotaque respectivamente). Así mismo importante parte central, occidental y oriental parece de riesgo alto por deslizamientos. Estos riesgos se pueden ver agravados en temporadas de lluvia. La climatología del municipio se ve influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), contando con una distribución de temporadas de lluvia de tipo bimodal, empezando la primera temporada lluviosa en abril y extendiéndose hasta mayo, el segundo periodo comprende los meses de septiembre a noviembre (PBOT Pacho, 2000), el comportamiento meteorológico mencionado debe ser tenido en cuenta para prever posibles crecientes o riesgos de deslizamiento que puedan afectar las condiciones de diseño de la planta que se propone en este proyecto de investigación, tales como el caudal del afluente del cual se alimentaría la misma. En este plano desarrollado por la Alcaldía Municipal de Pacho para el PBOT del año 2000 (aún continúa vigente), las zonas demarcadas por franjas verdes hacen referencia a un riesgo alto por inundación, mientras que las zonas delimitadas con franjas rojas corresponden a riesgo alto de deslizamientos. Nombrados en color morado se referencian los barrios, así como las vías de principal acceso al casco urbano. Tomando en cuenta la figura 12, donde se ilustra en un mapa (elaboración propia) los puntos de vertimiento priorizados, los afluentes principales, así como la ubicación propuesta de la planta por el PSMV del año 2017, es notorio que este predio no se encuentra en una zona con los potenciales riesgos que fueron discutidos anteriormente.

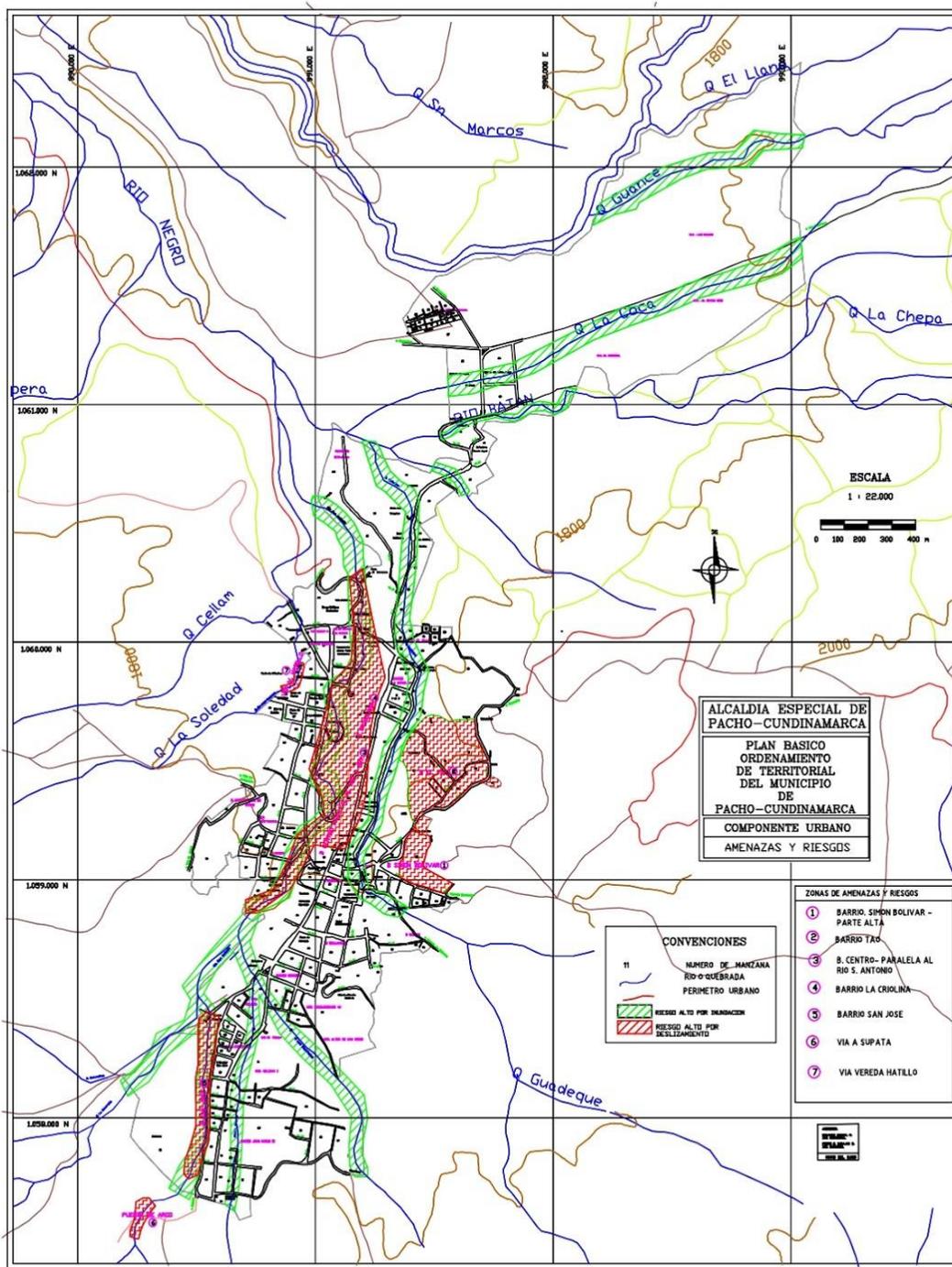


Figura 21. Zonas de Amenazas y Riesgos
Fuente. PBOT Pachó, 2000.

15.3.3.4 Ecosistemas y zonas recreativas

Las zonas de conservación más críticas deben ser tenidas en cuenta para escoger el sitio para erigir una obra, ya que el traslado de materiales, concurrencia de vehículos, generación de residuos, adecuación del espacio y operación de maquinaria puede causar un impacto a los ecosistemas presentes y cercanos, por lo que se debe seleccionar un terreno lo más alejado posible de estas.

En el plano de usos del suelo, perteneciente al PBOT municipal, que corresponde a la figura 10, se representan las zonas de protección y conservación existentes en el territorio, demarcado por un color verde oscuro, mientras que las zonas recreativas y áreas verdes han sido resaltadas con un verde claro y están ubicadas al interior de la cabecera municipal de Pacho. Tanto este plano como el de zonas de amenazas y riesgos es un componente fundamental para escoger la ubicación propuesta para la PTARM. Mediante la comparación de la figura 10 con la 18, tal como se realizó en el apartado de Zonas de Riesgo, es evidenciable que la ubicación para Planta propuesta por el PSMV del año 2017 no perturba ningún ecosistema o zona recreativa resaltada por el PBOT municipal, año 2000.

15.3.3.5 Dirección de los vientos

La información registrada a continuación ha sido tomada del portal en línea “Atlas Interactivo - Vientos IDEAM” en donde se puede consultar la tendencia de las corrientes de los vientos a nivel nacional de forma mensual y anual, a través de mapas de Dirección de Procedencia del Viento, donde los datos a acceso público más recientes corresponden al año 2015. Con base en los datos anuales, se analiza el comportamiento de los vientos en el territorio, de manera que se evidencie que la ubicación planteada no es susceptible a dirigir olores hacia la población. Como es observable en la siguiente figura, se resalta en un cuadro rojo al departamento de Cundinamarca y en una elipse del mismo color, al interior de este, el área en el departamento donde se ubica el casco urbano de Pacho. Por medio de la interpretación de la leyenda del plano suministrado por el IDEAM, es posible afirmar que los vientos en este territorio proceden del este, dirigiéndose por consiguiente hacia el oeste, una dirección contraria a donde se ubica la cabecera municipal, la cual está a dirección sureste tomando como punto central de referencia a la ubicación de propuesta de la Planta.

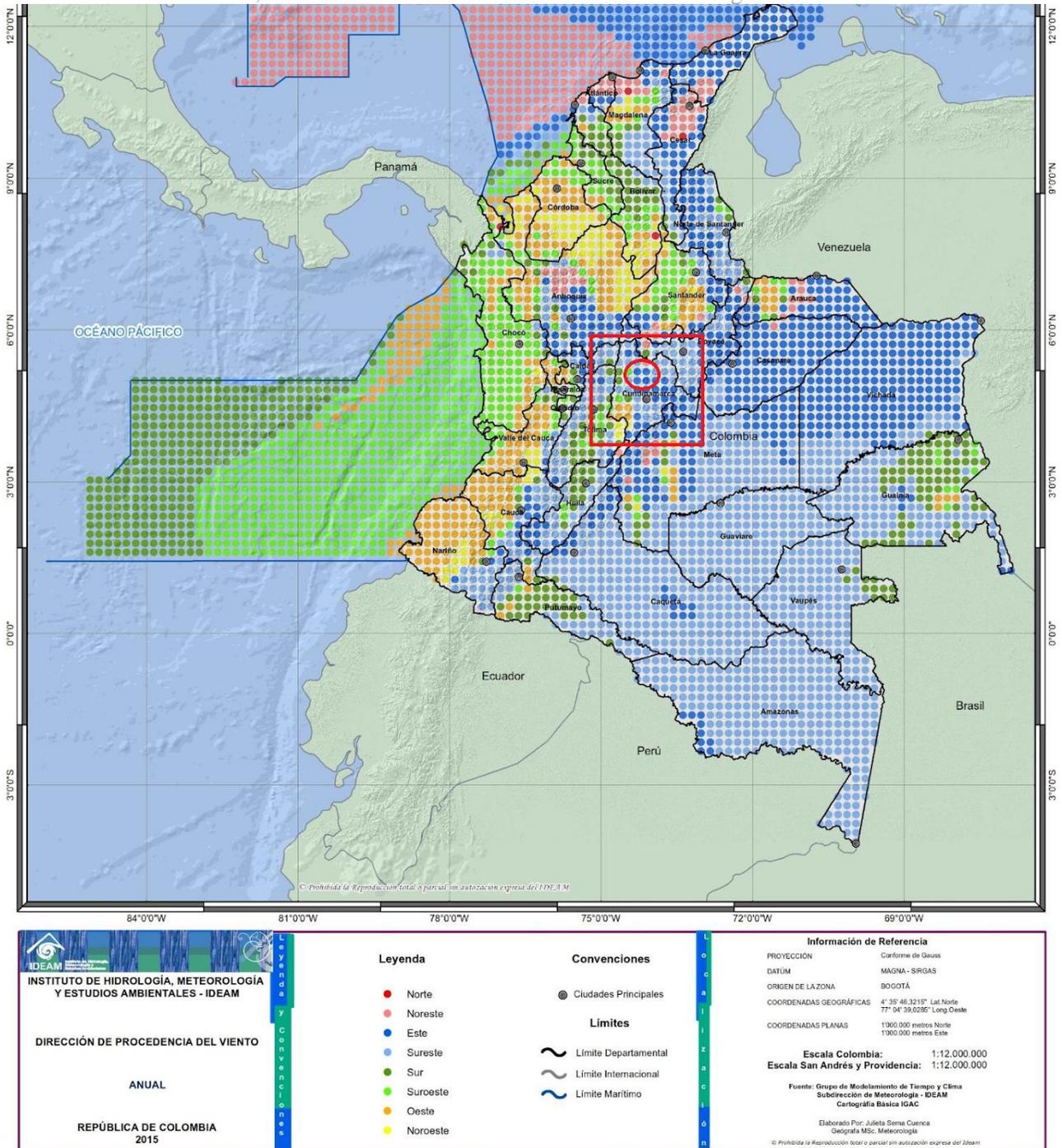


Figura 22. Dirección de procedencia del Viento. Año 2015.
Fuente. IDEAM

15.3.4 Desarrollo de metodología de selección de tecnologías

Para efectuar este ejercicio se calificó cada tecnología postulada considerando tres atributos, con los cuales es posible ponderar mediante una función de productoria qué tecnología es más adecuada tomando en cuenta el contexto técnico, el económico y el ambiental, como consolida el autor Rodríguez Miranda,

J. P. en la metodología que se seleccionó para el desarrollo de este apartado. Las tecnologías que se han tomado en cuenta para el desarrollo de este análisis se enlistan a continuación.

Opciones de tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales			
Tipo de tratamiento	Opciones	Eficiencia Remoción DBO5 (%)	Eficiencia Remoción SST (%)
Pretratamiento	Cribado	0 a 15	10 a 50
	Trampa de grasas	0 a 5	10 a 15
Tratamiento primario	Sedimentador primario	30 a 40	50 a 65
Tratamiento secundario	RAFA	65 a 80	60 a 70
	Zanja de Oxidación	> 80 - 85	> 80 - 85
	Lodos activados	80 a 95	80 a 90
	Filtro Anaerobio	65 a 80	60 a 70

*Tabla 56. Opciones de tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales
Fuente. Autores con base en el RAS, 2017*

15.3.4.1 Selección del Pretratamiento

15.3.4.1.1 Cribado

El primer componente de remoción de cargas, como es común en las PTAR, es el cribado, eficaz para la remoción de sólidos suspendidos de diferentes tamaños. En primer lugar, se plantea un cribado grueso para remoción de partículas de tamaño considerable que pueden afectar los mecanismos subsecuentes, seguido de un cribado fino. Para fines de alivio de costos se plantea un sistema manual (espaciamientos entre barras de la rejilla de 15 a 50 mm limpieza manual). Unido a esto, equipos como el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) requieren para su buen funcionamiento y durabilidad un tratamiento previo de captura de sólidos que pudieran llegar a obstruir el filtro.

15.3.4.1.2 Remoción de grasas

Debido a las descargas predominantes de tipo doméstico en Pacho, las cuales suelen contener cantidades apreciables de jabones, residuos de comida, así como la existencia de descargas provenientes del sector agrícola, se considera en el diseño la inclusión de trampas de grasas tipo colectivo como segundo método de pretratamiento.

15.3.4.2 Selección del tratamiento biológico (primario y secundario)

A modo de hacer la comparación y establecer el mejor sistema de tratamiento, se tomó como base lo estipulado por diferentes autores relevantes acerca de estos tipos de tratamientos, a nivel internacional, en cuanto a costos de inversión, eficiencia, temperatura del agua residual, demanda de área y el nivel de capacitación requerida en los operarios. Esta información sirvió como insumo para el desarrollo de la matriz del autor Rodríguez Miranda, J. P.

Las siguientes tablas representan ventajas y desventajas a tener en cuenta en el posterior capítulo donde se evaluaron diversos aspectos que se observan en las tablas.

PST: sedimentador primario; UASB: RAFA; WSP: lagunaje; TF: filtro de goteo; AS: lodos activados

	PST	UASB	WSP			TF	AS
	anaerobic	anaerobic	anaerobic	facultative	maturation	aerobic	aerobic
environmental conditions	++	+	++	++	-	+	++
suited for raw sewage	++	+	++	++	-	+	++
suited for settled sewage	-	++	++	++	-	++	++
suited for wastewater temperatures	> 5°C	> 20°C	> 5°C	> 5°C	> 5°C	> 5°C	> 5°C
BOD removal efficiency	30-40%	> 70 %	> 50 %	> 70 %	> 50%	80-90%	> 90 %
nutrient (N, P) removal efficiency	-	-	-	-	-	+(++)	+(++)
coliform removal	25-75%	90%	90%	90-99%	> 99%	90-95%	90-98%
helminth egg removal	90%	90%	99%	99%	99%	90-99%	90-99%
typical HRT	1-2 h	ca. 6 h	> 1 d	> 4 d	> 3 d	ca. 6 h	ca. 15 h
odour nuisance	+	++	+	+	++	++	++
energy demand & gas production	++	++	++	++	++	+(++)	-
land requirement	++	++	+	-	-	+	+
requiring skilled operators	++	+/-	++	++	++	+	-
investment cost	++	++	++	+	+	+	-

Tabla 57. Matriz de comparación de tratamientos biológicos
Fuente. Metcalf & Eddy (1996).

Process	Oxygen Supply	Reactor Volume	Retention Time	Removal Efficiency
Activated sludge	Pressurized air	10 m ³	4-6 hr	90%-95% organic matter 90%-95% suspended solids
Biologic rotary discs	Air	1 m ³	1-3 hr	90%-95% organic matter
Ascendant flow	Anaerobic	2 m ³	24 hr	50%-60% organic matter 57% suspended solids
Anaerobic filtration	Anaerobic	2 m ³	36 hr	40%-50% organic matter 52% suspended solids
Septic tank	Anaerobic	2 m ³	36 hr	25% organic matter
Hydroponic cultivation	Aerobic/anaerobic	6 m ³	12 hr	65%-75% organic matter

Tabla 58. Rendimiento comparativo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales
Fuente. Metcalf & Eddy (1996).

Treatment Type	Advantages	Disadvantages
<i>Aquatic Systems</i>		
Stabilization lagoons	Low capital cost Low operation and maintenance costs Low technical manpower requirement	Requires a large area of land May produce undesirable odors
Aerated lagoons	Requires relatively little land area Produces few undesirable odors	Requires mechanical devices to aerate the basins Produces effluents with a high suspended solids concentration
<i>Terrestrial Systems</i>		
Septic tanks	Can be used by individual households Easy to operate and maintain Can be built in rural areas	Provides a low treatment efficiency Must be pumped occasionally Requires a landfill for periodic disposal of sludge and septage
Constructed wetlands	Removes up to 70% of solids and bacteria Minimal capital cost Low operation and maintenance requirements and costs	Remains largely experimental Requires periodic removal of excess plant material Best used in areas where suitable native plants are available
<i>Mechanical Systems</i>		
Filtration systems	Minimal land requirements; can be used for household-scale treatment Relatively low cost Easy to operate	Requires mechanical devices
Vertical biological reactors	Highly efficient treatment method Requires little land area Applicable to small communities for local-scale treatment and to big cities for regional-scale treatment	High cost Complex technology Requires technically skilled manpower for operation and maintenance Needs spare-parts-availability Has a high energy requirement
Activated sludge	Highly efficient treatment method Requires little land area Applicable to small communities for local-scale treatment and to big cities for regional-scale treatment	High cost Requires sludge disposal area (sludge is usually land-spread) Requires technically skilled manpower for operation and maintenance

Tabla 59. Rendimiento comparativo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales
Fuente. Metcalf & Eddy (1996).

15.3.4.3 Evaluación para la selección de tecnologías

Basándose en los parámetros de cualificación estipulados por la metodología de selección del autor (técnico, económico y ambiental), a partir de los cuales se efectúa el cálculo de selección de tecnologías ITOPTARM, se evaluó cada una de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales crudas que han sido postuladas a manera de seleccionar el tratamiento definitivo para diseño. A manera de hacer más sencillo este análisis, se planteó en primer lugar una matriz de comparación de viabilidad para cada tecnología postulada, tomando como insumo para el desarrollo de la misma las ventajas y desventajas que exponen los autores citados en las tablas 57, 58 y 59 acerca de los diferentes tipos de tratamiento. La calificación se llevó a cabo con base en los parámetros de evaluación de Metcalf & Eddy (1996).

Cualificación - Matriz de Análisis	
Significancia	Valor asignado
Excelente	++
Positivo	+
Negativo	-

Tabla 60. Cualificación aplicable a la matriz de análisis
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy (1996).

15.3.4.3.1 Primera alternativa

	Parámetro	Sedimentador Primario	Filtro Anaerobio	RAFA	Representatividad
Técnico	Confiabilidad	++	++	+	++
	Viabilidad	+	+	++	+
	Flexibilidad	++	+	+	+
	Complejidad	+	-	+	+
	Accesibilidad	++	+	++	++
	Requerimiento análisis y controles	-	-	+	-
	Tratamiento y manejo de subproductos	-	+	+	+
Económico	Costos de inversión, operación y mantenimiento	++	++	++	++
	Requerimiento de área	++	++	++	++
	Empleo de energía eléctrica	++	++	++	++
	Relación con otros proyectos	++	++	++	++
	Requerimiento de personal calificado	++	-	-	-
	Participación Local	+	+	+	+
Ambiental	Generación de olores, ruidos y espumas	+	-	+	+
	Impacto estético	+	+	+	+
	Reutilización de aguas tratadas	+	+	+	+
	Estabilidad de la PTARM	+	+	+	+

Tabla 61. Matriz de análisis de la primera alternativa de tratamiento
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy (1996).

Metodología de selección de tecnologías - Primera alternativa				
Atributo	Parámetro	Valor asignado (P)	Peso de importancia (a)	P ^a
Técnico (42%)	Confiabilidad	10	0.06	1.15
	Viabilidad	20	0.06	1.20
	Flexibilidad	20	0.06	1.20
	Complejidad	20	0.06	1.20
	Accesibilidad	10	0.06	1.15
	Requerimientos de análisis y controles	30	0.06	1.23
	Tratamiento y manejo de subproductos	20	0.06	1.20
Económico (36%)	Costos de inversión, operación y mantenimiento	10	0.06	1.15
	Requerimiento de área	10	0.06	1.15
	Empleo de energía eléctrica	10	0.06	1.15
	Relación con otros proyectos	10	0.06	1.15
	Requerimiento de personal calificado	30	0.06	1.23
	Participación Local	10	0.06	1.15
Ambiental (22%)	Generación de olores, ruidos y espumas	10	0.055	1.14
	Impacto estético	10	0.055	1.14
	Reutilización de aguas tratadas	10	0.055	1.14
	Estabilidad de la PTARM	10	0.055	1.14
			ITO_{PTARM}	13.47

Tabla 62. Matriz de selección de tecnologías. Primera Alternativa
Fuente. Autores con base en Miranda, Ubaque, & Pinzón (2015)

15.3.4.3.2 Segunda alternativa

	Parámetro	Sedimentador Primario	Filtro Anaerobio	Zanja de Oxidación	Representatividad
Técnico	Confiabilidad	++	++	++	++
	Viabilidad	+	+	+	+
	Flexibilidad	++	+	+	+
	Complejidad	+	-	-	-
	Accesibilidad	++	+	+	+
	Requerimiento análisis y controles	-	-	+	-
	Tratamiento y manejo de subproductos	-	+	++	-
Económico	Costos de inversión, operación y mantenimiento	++	++	-	++
	Requerimiento de área	++	++	-	++
	Empleo de energía eléctrica	++	++	+	++
	Relación con otros proyectos	++	++	+	++
	Requerimiento de personal calificado	++	-	-	-
	Participación Local	+	+	-	+
Ambiental	Generación de olores, ruidos y espumas	+	-	+	+
	Impacto estético	+	+	+	+
	Reutilización de aguas tratadas	+	+	+	+
	Estabilidad de la PTARM	+	+	+	+

Tabla 63. Matriz de análisis de la segunda alternativa de tratamiento
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy (1996).

Metodología de selección de tecnologías - Segunda alternativa				
Atributo	Parámetro	Valor asignado (P)	Peso de importancia (a)	P ^a
Técnico (42%)	Confiabilidad	10	0.06	1.14815362
	Viabilidad	20	0.06	1.19691084
	Flexibilidad	20	0.06	1.19691084
	Complejidad	30	0.06	1.22638626
	Accesibilidad	20	0.06	1.19691084
	Requerimientos de análisis y controles	30	0.06	1.22638626
	Tratamiento y manejo de subproductos	30	0.06	1.22638626
Económico (36%)	Costos de inversión, operación y mantenimiento	10	0.06	1.14815362
	Requerimiento de área	10	0.06	1.14815362
	Empleo de energía eléctrica	10	0.06	1.14815362
	Relación con otros proyectos	10	0.06	1.14815362
	Requerimiento de personal calificado	30	0.06	1.22638626
	Participación Local	20	0.06	1.19691084
Ambiental (22%)	Generación de olores, ruidos y espumas	20	0.055	1.17911632
	Impacto estético	20	0.055	1.17911632
	Reutilización de aguas tratadas	20	0.055	1.17911632
	Estabilidad de la PTARM	20	0.055	1.17911632
			ITO _{PTARM}	17.9053535

Tabla 64. Matriz de selección de tecnologías. Segunda Alternativa
Fuente. Autores con base en Miranda, Ubaque, & Pinzón (2015)

15.3.4.3.3 Tercera alternativa

	Parámetro	Sedimentador Primario	Lodos activados convencionales	Representatividad
Técnico	Confiabilidad	++	++	++
	Viabilidad	+	+	+
	Flexibilidad	++	-	+
	Complejidad	+	-	-
	Accesibilidad	++	-	-
	Requerimiento análisis y controles	-	-	-
	Tratamiento y manejo de subproductos	-	-	-
Económico	Costos de inversión, operación y mantenimiento	++	-	-
	Requerimiento de área	++	+	+
	Empleo de energía eléctrica	++	-	-
	Relación con otros proyectos	++	++	++
	Requerimiento de personal calificado	++	-	-
	Participación Local	+	+	+
Ambiental	Generación de olores, ruidos y espumas	+	+	+
	Impacto estético	+	+	+
	Reutilización de aguas tratadas	+	+	+
	Estabilidad de la PTARM	+	+	+

Tabla 65. Matriz de análisis de la tercera alternativa de tratamiento
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy (1996).

Metodología de selección de tecnologías - Tercera alternativa				
Atributo	Parámetro	Valor asignado (P)	Peso de importancia (a)	P ^a
Técnico (42%)	Confiabilidad	10	0.06	1.14815362
	Viabilidad	20	0.06	1.19691084
	Flexibilidad	20	0.06	1.19691084
	Complejidad	30	0.06	1.22638626
	Accesibilidad	30	0.06	1.22638626
	Requerimientos de análisis y controles	30	0.06	1.22638626
	Tratamiento y manejo de subproductos	30	0.06	1.22638626
Económico (36%)	Costos de inversión, operación y mantenimiento	30	0.06	1.22638626
	Requerimiento de área	20	0.06	1.19691084
	Empleo de energía eléctrica	30	0.06	1.22638626
	Relación con otros proyectos	10	0.06	1.14815362
	Requerimiento de personal calificado	30	0.06	1.22638626
	Participación Local	20	0.06	1.19691084
Ambiental (22%)	Generación de olores, ruidos y espumas	20	0.055	1.17911632
	Impacto estético	20	0.055	1.17911632
	Reutilización de aguas tratadas	20	0.055	1.17911632
	Estabilidad de la PTARM	20	0.055	1.17911632
			ITO_{PTARM}	21.8205014

Tabla 66. Matriz de selección de tecnologías. Tercera Alternativa
Fuente: Autores con base en Miranda, Ubaque, & Pinzón (2015)

Por medio de esta metodología de selección, fue estipulada la primera opción de tecnologías como la alternativa de tratamiento del agua residual municipal debido a su menor puntaje al momento de evaluar los aspectos, además de los puntajes a favor obtenidos, debido a que el uso de filtros anaerobios para el postratamiento de efluentes provenientes de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) ha demostrado ser eficiente, alcanzándose concentraciones menores a 60 mg/L de DBO en el efluente de la Planta incluso en poblaciones superiores a los 50.000 habitantes, la combinación de tratamiento RAFA-FAFA es reconocida por su viabilidad tanto en eficiencia como en términos de costos debido al bajo consumo energético que presentan estos sistemas de tratamiento, su prolongada vida útil y la oportunidad que aportan para el aprovechamiento energético a partir del biogás y el metano generados a través de su operación (Chernicharo de Lemos, 2007). A continuación, se muestra en la figura 23 la opción de tratamiento seleccionada.

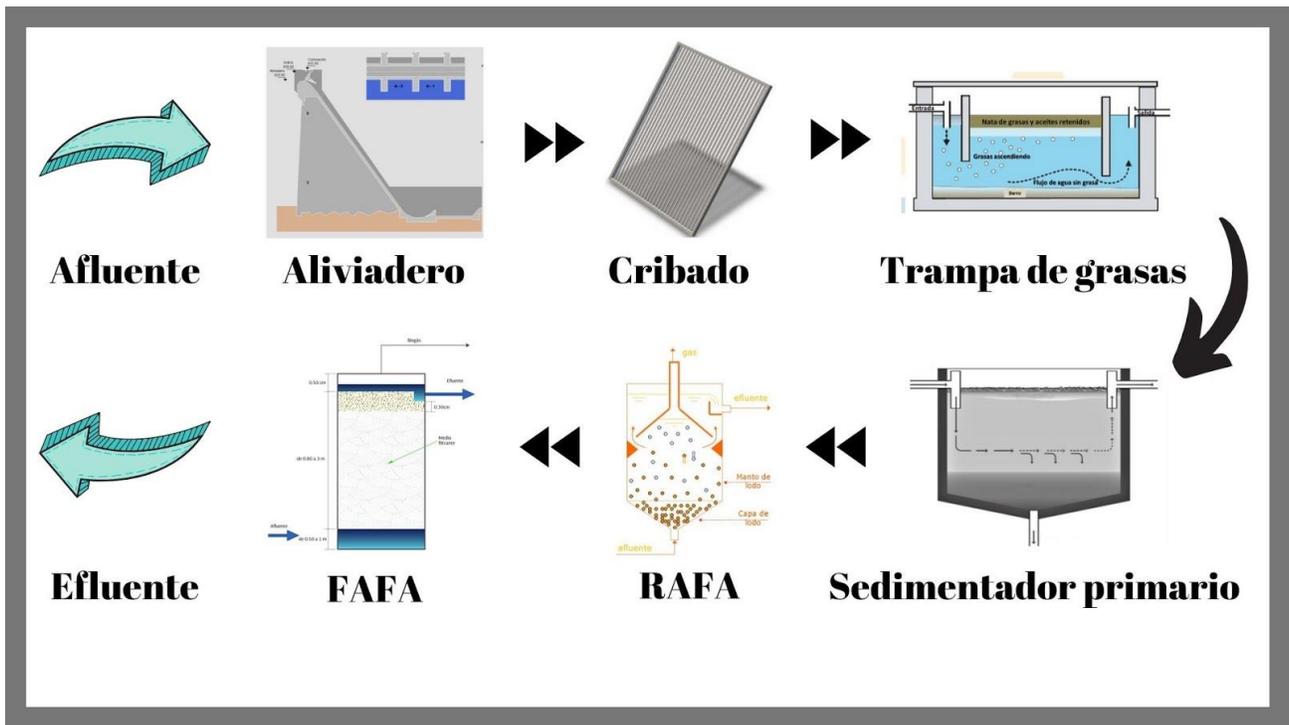


Figura 23. Esquema de la configuración de la Planta.
Fuente. Autores

15.3.5 Diseño de la Planta de Tratamiento del agua residual

En este apartado fue desarrollado el dimensionamiento de las tecnologías seleccionadas para integrar la configuración de la Planta, teniendo como principal referente bibliográfico el título E del RAS “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES” por parte del Ministerio de Vivienda, año 2017.

15.3.5.1 Aliviadero

Con el fin de que en temporada de lluvia la planta no se vea excedida en su capacidad de almacenamiento y por lo tanto en su tratamiento del recurso hídrico, se diseñó un Aliviadero el cual tiene la función de que en caso de presentarse intensas lluvias se vierta el caudal que la planta no contempla por uno de sus laterales.

Esto debe cumplir con ciertas características como lo son el coeficiente de dilución el cual nunca podrá ser menor de 5 a 1 según el RAS 2017, así como cumplir con determinadas áreas libres por donde se garantice el correcto flujo hidráulico sin comprometer la funcionalidad de la planta de tratamiento. Este caudal vertido se dirige directamente al cuerpo de agua receptor.

Según el RAS 2017, un aliviadero es “Una estructura diseñada en sistemas combinados, con el propósito de separar los caudales de aguas lluvias de los caudales de aguas residuales y conducirlos por un sistema de drenaje de agua lluvia o una corriente natural cercana”, teniendo esto en cuenta se hace coherente el

diseño de este aliviadero observando que la red de alcantarillado de Pacho es en su mayoría una red combinada en donde no se separan caudales lluvias y residuales.

Este diseño sigue las siguientes ecuaciones y parámetros establecidos, además se obtuvo una tabla de posibles dimensiones siendo elegida la que satisfacía las condiciones del caudal para el municipio.

Concepto	Ecuación de diseño
Coeficiente de dilución	$Coef\ Dilución = \frac{Q_{md} + Q_{LL}}{Q_{md}}$
	Qmd= Caudal medio (m3/s)
	QLL= Caudal lluvia (m3/s)
Caudal vertido (m3/s)	$Q_v = (Q_{mh} + Q_{LL}) - (Coef\ dilución * Q_{md})$
	Qmh= Caudal máximo horario (m3/s)
	QLL= Caudal lluvia (m3/s)
	Qmd= Caudal medio (m3/s)
Coeficiente de descarga (Ecuación de Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos)	$\mu = \left\{ 0.615 + \frac{0.615}{1000H + 1.6} \right\} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$
	H= altura encima del baffle (m)
	D= altura total del aliviadero (m)
Criterios utilizados para el aliviadero según la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos	$0.025m \leq H \leq 0.80m$
	$0.30m \leq p$ $\frac{H}{p} \leq 1$ Ecuación de Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos
Q - Caudal (m3/s)	$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$
	n de Manning para el concreto = 0.015
	b= Ancho (m)
	D= altura total del aliviadero (m)
	A=b*D Área (m2)
	P=(2*D)+b Perímetro mojado (m)
S= Pendiente supuesta para el aliviadero	
Largo Aliviadero (m)	$L = \frac{Q_v}{\frac{2}{3} \mu h \sqrt{2gh}}$
	Qv= Caudal vertido (m3/s)
	μ= Coeficiente de descarga
	h= altura encima del baffle (m)
	g= gravedad (m/s2)

Tabla 67. Ecuaciones y criterios utilizados en aliviadero.

Así mismo los datos utilizados y obtenidos fueron los enlistados en las siguientes tablas.

Concepto	Valor	Unidades
Qmd - Caudal medio	0.04	m3/s
Qmh - Caudal máximo horario	0.21	m3/s
Factor	2.47	-
Coefficiente de dilución	3.65	-
Qv - Caudal vertido	0.17	m3/s
Q II - Caudal lluvia	0.11	m3/s
Qmax - Caudal máximo	0.33	m3/s
h - Altura encima del bafle	0.30	m
p - Altura del bafle	0.50	m
Coefficiente de descarga	0.62	-
L - Largo aliviadero	0.57	m

Tabla 68. Datos obtenidos del desarrollo de ecuaciones y proyecto.
Fuente. Autores

En la siguiente tabla se muestran diversas opciones de alturas y anchos para el aliviadero siendo seleccionada la resaltada teniendo en cuenta el caudal propuesto para la entrada de este.

n	b (m)	y (m)	A (m2)	P (m)	S	Q (m3/s)
0.015	0.65	0.8	0.52	2.25	0.0008	0.37
0.015	1	1	1	3	0.0008	0.91
0.015	1	1.5	1.5	4	0.0008	1.47
0.015	2	1.2	2.4	4.4	0.0008	3.02
0.015	2	1.4	2.8	4.8	0.0008	3.69
0.015	2	2	4	6	0.0008	5.76
0.015	2.1	2	4.2	6.1	0.0008	6.18
0.015	2.4	2	4.8	6.4	0.0008	7.47
0.015	2.5	2	5	6.5	0.0008	7.92

Tabla 69. Dimensionamiento obtenido a partir del desarrollo de ecuaciones para aliviadero.
Fuente. Autores

15.3.5.2 Cribado

El cribado es una unidad de pretratamiento la cual tiene como objetivo retener sólidos de un tamaño considerable, dependiendo de las rejillas propuestas tendrá un nivel de retención para determinados elementos, y así prevenir un taponamiento o un mal funcionamiento en los procesos siguientes a este en el sistema de tratamiento, además este pretratamiento según el RAS 2017 tiene una eficiencia de hasta un 15% para DBO5 y de hasta un 50% para SST (Minvivienda, 2017).

Para dar inicio como tal a las unidades de tratamiento que se proponen en el diseño, se contempla el cribado, este cuenta con tanto rejillas gruesas como finas para asegurar una retención de elementos gruesos y finos que puedan incidir en las demás unidades diseñadas.

Las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de ambos diseños son las siguientes

Concepto	Ecuación de diseño	Concepto	Ecuación de diseño		
Ancho Rejillas	$b = c + \left(\frac{c}{s} - 1\right) * a$	Velocidad de paso por rejilla	$V_{pr} = \frac{Q}{h_r * S_L}$		
				b= Ancho rejillas (m)	Vpr= Velocidad de paso por rejilla (m/s)
				c= ancho de canal (m)	Q= Caudal (m3/s)
				s= separación entre barrotes (m)	hr= Altura rejillas (m)
	a= ancho barrotes (m)		BL= Borde libre (m)		
Altura Rejillas	$h_r = \frac{h_t}{\sin \theta} + B_L$	Velocidad de aproximación	$V_{ap} = \frac{Q}{(W - a) * h_L}$		
				hr= Altura rejillas (m)	Vap= Velocidad de aproximación (m/s)
				ht= Altura tanque (m)	Q= Caudal (m3/s)
				BL= Borde libre (m)	hL= altura lamina de agua (m)
	Sin(Angulo rejillas)		c= Ancho de canal (m)		
			a= ancho barrotes (m)		
Área rejilla	$A_r = b * h_r$	K	$K = \beta + \left(\frac{a}{s}\right)^{1.33} * \sin \theta$		
				Ar= Área rejilla (m2)	K=
				b= Ancho rejillas (m)	β= Coeficiente de pérdida
				hr= Altura rejillas (m)	a= ancho barrotes (m)
			s= separación entre barrotes (m)		
Sección libre	$S_L = b * 30\%$	Pérdida de energía	$hf = \sum K * \frac{v^2}{2g}$		
				SL= Sección libre (m)	hf= pérdida de energía (m)
				b= Ancho rejillas (m)	K=
			v= velocidad de aproximación (m/s)		
			g= gravedad (m/s2)		

Tabla 70. Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del Cribado parte 1.

Concepto	Ecuación de diseño	Concepto	Ecuación de diseño
Numero de espacios	$N = \frac{A_r + s}{a + s}$	Area bruta	$A_B = \frac{A_N}{R_L}$
	N= Numero de separaciones		AB= Área Bruta (m2)
	Ar= Área rejilla (m2)		AN= Área Neta (m2)
	a= ancho barrotos (m)		RL= Relación libre
Numero de rejillas	$N_r = N - 1$	Velocidad Canal	$V_C = \frac{Q}{A_B}$
	Nr= Numero de rejillas		VC= Velocidad Canal (m/s)
	N= Numero de separaciones		Q= Caudal (m3/s)
Relación libre	$R_L = \frac{s}{a + s}$	Área neta	$A_N = \frac{Q}{V_{pr}}$
	RL= Relación libre		AN= Área neta (m2)
	s= separación entre barrotos (m)		Q= caudal (m3/s)
	a= ancho barrotos (m)		Vpr= Velocidad de paso por rejilla (m/s)

Tabla 71. Ecuaciones utilizadas para el desarrollo del Cribado parte 2.

15.3.5.2.1 Cribado Grueso

Para las rejillas gruesas se obtuvieron los siguientes parámetros y dimensionamiento.

Ancho rejillas (m)	Altura de rejilla (m)	Área rejilla (m2)	Sección libre (m)	Velocidad de paso por rejilla (m/s)
1.0	0.8	0.8	0.3	0.90
Velocidad aproximación (m/s)	K	Perdidas de energía (m)	Numero espacios	Numero rejillas
0.29	2.04	0.08	12	11
Relación libre	Área neta (m2)	Área bruta (m2)	Velocidad Canal (m/s)	
0.67	0.24	0.36	0.60	

Tabla 72. Parámetros obtenidos del desarrollo de las ecuaciones para Cribado Grueso
Fuente. Autores

Teniendo en cuenta los siguientes criterios

Separación de barrotos (m)	0.05
Ancho de barrotos (m)	0.025
Rejillas tipo C (Beta)	1.67
Caudal (m ³ /s)	0.21
Angulo de barrotos	75

Tabla 73. Criterios utilizados en el Cribado
Fuente. Autores

Se resalta que estas rejillas deben ser de tipo mecánico teniendo en cuenta la velocidad de paso por estas donde llegan al límite para considerarse de tipo mecánico, es decir, deben contar con un sistema de remoción automatizado para prevenir que se llegue a un determinado punto de taponamiento de la rejilla que impida el funcionamiento hidráulico del sistema de tratamiento.

15.3.5.2.2 Cribado Fino

Para las rejillas finas se obtuvieron los siguientes parámetros y dimensionamiento.

Ancho rejillas (m)	Altura de rejilla (m)	Área rejilla (m ²)	Sección libre (m)	Velocidad de paso por rejilla (m/s)
1.0	0.8	0.8	0.3	0.79
Velocidad aproximación (m/s)	K	Perdidas de energía (m)	Numero espacios	Numero rejillas
0.28	2.07	0.07	41	40
Relación libre	Área neta (m ²)	Área bruta (m ²)	Velocidad Canal (m/s)	
0.65	0.27	0.42	0.52	

Tabla 74. Parámetros obtenidos del desarrollo de las ecuaciones para Cribado Fino
Fuente. Autores

Teniendo en cuenta los criterios previamente expuestos en el cribado Grueso. Estas rejillas se colocarían en secuencia a las rejillas gruesas lo que permite una mayor eficiencia en la remoción de sólidos.

15.3.5.3 Trampa de grasas

Continuando con las unidades seleccionadas, se diseñó una trampa de grasas la cual siguiendo el RAS 2017, aporta una reducción de hasta un 5% en DBO₅ y hasta un 15% en SST. Esta unidad es uno de los requisitos junto al cribado para haber seleccionado un UASB o RAFA que se explicó más adelante. Así mismo esta unidad tiene como objetivo la protección de las unidades consecuentes a esta ya que retendrá, como su nombre lo indica, grasas y aceites que pueden alterar o directamente inhabilitar los tratamientos propuestos, como el filtro anaerobio o el sedimentador primario (Minvivienda, 2017)

Para el desarrollo del diseño de esta unidad se tomaron en cuenta las siguientes ecuaciones.

Concepto	Ecuación de diseño
Volumen (m3)	$V = Q * TRH$
	Q = Caudal de Diseño (m3/h)
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
Área superficial (m2)	$A_S = \frac{Q}{V_A}$
	Q = Caudal de Diseño (m3/h)
	VA= Velocidad Ascendente (m/s)
Altura del tanque (m)	$h_T = \frac{V}{A}$
	V= Volumen (m3)
	A= Área (m2)

Tabla 75. Ecuaciones de diseño para Trampa de Grasas.
Fuente. Autores con base al RAS, 2017

Siguiendo los parámetros mínimos a cumplir y las características de una trampa de grasas se obtuvieron los siguientes valores.

Área (m ²)	Indicaciones		
	0.25 (m ²)	1 (L/s)	
Relación Ancho/Longitud	1	4	Mínimo
	1	16	Máximo
Velocidad ascendente (m/s)	0.004		Mínimo
Diámetro tubo de entrada (mm)	50		Mínimo
Sumergencia tubo de entrada (mm)	150		Mínimo
Diámetro tubo de salida (mm)	150		Mínimo
Sumergencia tubo de salida (m)	0.9		Mínimo
	150 mm	del fondo del tanque	
Ubicación tubería	50%	del ancho de la trampa	
Altura tubería	35%	de la altura de la trampa	
Ubicación Bafle	75%	largo de la trampa	
Altura bafle	90%	de la altura de la trampa	
Espacio entre bafle y el fondo	10%	de la altura de la trampa	
Tiempo de retención hidráulico (minutos)	3	2 - 9 L/s	
	4	10 - 19 L/s	
	5	20 o mas	

Tabla 76. Características a cumplir por la trampa de grasas

Fuente. Autores con base al RAS, 2017

Así mismo en base a estos criterios y ecuaciones se obtuvieron los siguientes valores para cada uno de los parámetros a cumplir en una trampa de grasas.

Caudal diseño	0.214		m ³ /s
TRH	213.9	300	Segundos
Volumen	64.2		Metros ³
Área superficial	53		Metros ²
Dimensiones A y L	4	14	Metros
	56.0		Metros ²
	4		Relación
Altura del tanque	1.15		Metros
Ubicación Tubería	50%	2.00	Metros
Altura tubería	35%	0.40	Metros
Ubicación Bafle	75%	10.5	Metros
Altura bafle	90%	0.90	Metros
Espacio entre bafle y el fondo	10%	0.11	Metros

Tabla 77. Resultados obtenidos del desarrollo de las ecuaciones.

Fuente. Autores

Se debe tener en cuenta que según el artículo 172 del RAS 2017 en su párrafo 1. aclara que estas trampas de grasas deben tener un mantenimiento regular en donde se asegure una disminución de olores y prevenir la dispersión de cantidades considerables de grasa. Se recomienda una limpieza al alcanzar el 75% de capacidad de retención de grasa.

15.3.5.4 Sedimentador primario

Tecnología diseñada para la eliminación de partículas mediante su sedimentación debido a la baja velocidad de flujo que hace posible su precipitación. Como opción para la remoción de sólidos suspendidos de tamaño reducido (50 - 65%) y DBO (30 - 40%), el sedimentador primario es una opción rentable para el tratamiento del agua, eficiente para proteger el funcionamiento de los equipos subsecuentes a este, siendo una alternativa bastante común tanto con poblaciones rurales como urbanas por su operación sencilla, confiabilidad de eficiencia y costos de operación. Es fundamental un adecuado y frecuente mantenimiento, así como buena operación para evitar la emisión de olores ofensivos a los alrededores, los trabajadores que entren en contacto con los lodos y la espuma del efluente deben portar ropa de protección debido a la considerable presencia de agentes patógenos en estos. La capa de natas que suele aparecer en la superficie del agua debe ser removida al menos dos veces por día, y remover de forma inmediata el lodo flotante. Es necesario remover el lodo con frecuencia y darle un tratamiento y disposición final adecuada, además, se debe contar con un manual de operación y mantenimiento el cual debe contemplar como mínimo lo siguiente (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000):

- Plan de limpieza
- Control de olores
- Operación en condiciones de caudales mínimo y máximo
- Gestión de lodos
- Prevención de cortocircuitos
- Arranque
- Control de lodos flotantes

El diseño del sedimentador primario fue efectuado conforme a la siguiente guía de cálculo.

Concepto	Ecuación de diseño
Área superficial requerida, en (m ²)	$A = \frac{Q}{CS}$
	Q = Caudal de Diseño (m ³ /d)
	CS = Carga de Superficie (m ³ /m ² *d)
Largo del tanque por medio de su relación largo-ancho (4 a 1), en m	$L = \sqrt{\frac{A}{4}}$
	A = Área superficial requerida (m ²)
Volumen del tanque, en (m ³)	$Vol = l * a * h$
	l = Largo (m)
	a = Ancho (m)
	h = Profundidad (m)
Carga Superficial Corregida (m ³ /m ² *d)	$CS = \frac{Q}{A}$
	Q= Caudal de Diseño (m ³ /d)
	A= Área superficial requerida (m ²)
Tiempo de retención Hidráulica (h)	$TRH = \frac{Vol}{Q}$
	Vol = Volumen del tanque (m ³)
	Q = Caudal de Diseño (m ³ /d)
Velocidad de arrastre (m/s)	$V_a = \left(\frac{8k(s-1)gd}{f}\right)^{1/2}$
	k = Constante de cohesión = 0.05
	s = Gravedad específica = 1.25
	g = Aceleración de la gravedad (m/s ²) = 9.81
	d = Diámetro de partículas (µm) = 100
f = Factor de fricción Darcy-Weisbach = 0.025	

Tabla 78. Guía de cálculo para el sedimentador primario parte 1
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy, 1996

Velocidad horizontal (m/s)	$V_h = \frac{Q}{A_x}$
	Q = Caudal de Diseño (m3/d)
	Ax = Sección de flujo (m2)
Remoción de DBO	$Rem\ DBO = \frac{THR}{a + b * THR}$
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
	a = Constante empírica = 0.018
	b = Constante empírica = 0.020
Remoción de SST	$Rem\ SST = \frac{THR}{a + b * THR}$
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
	a = Constante empírica = 0.0075
	b = Constante empírica = 0.014

Tabla 79. Guía de cálculo para el sedimentador primario parte 2
Fuente. Autores con base en Metcalf & Eddy, 1996

SEDIMENTADOR PRIMARIO	
PARÁMETROS DE DISEÑO	
Caudal de Diseño (m3/d)	18489.6
Caudal de Diseño (m3/h)	770.4
Caudal de Diseño (m3/s)	0.214
TRH (h)	2
TDS (m3/m2*d)	50
Carga sobre vertedero (m3/m*d)	250
Relación largo / ancho	4 a 1
DBO Afluente (mg/L)	336.49
SST Afluente (mg/L)	262.52

Tabla 80. Diseño del sedimentador primario parte 1
Fuente. Autores

DIMENSIONAMIENTO	
Área superficial Q medio (m2)	369.79
Largo (m)	10.00
Ancho (m)	39.00
Profundidad (m)	4.00
Volumen Tanque (m2)	1560.00
TDS corregida (m3/m2*d)	47.41
TRH corregido (h)	2.02
Va (m/s)	0.06
Vh (m/s)	0.01
Remoción DBO (%)	34.61
Remoción SST (%)	56.48
DBO Efluente (mg/L)	220.01
SST Efluente (mg/L)	114.24

Tabla 81 Diseño del sedimentador primario parte 2
Fuente. Autores

15.3.5.5 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)

Con una alta eficiencia para la remoción de la materia orgánica (65 - 80 %), sólidos en suspensión (60 - 70 %), la posibilidad de usar su biogás para la generación energética (con frecuencia necesitando una depuración con anterioridad) y una producción relativamente baja de lodo, el reactor RAFA es una buena opción para el tratamiento de aguas residuales con predominancia de descargas con origen orgánico y abundantes caudales, se debe tener en cuenta que requiere de operarios capacitados para el correcto monitoreo del reactor y en caso de reparaciones. No requiere de un desenlodado frecuente debido a la baja generación (suele realizarse cada dos o tres años), el biogás es acumulado en un domo de recolección y con su potencialidad de aprovechamiento energético se puede sentar una amortiguación a los costos por la demanda constante de energía y agua del reactor.

El diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente fue efectuado conforme a la siguiente guía de cálculo.

Concepto	Ecuación de diseño
Volumen del reactor (m3)	$V = Q * TRH$
	Q = Caudal de Diseño (m3/h)
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)

Tabla 82. Guía de cálculo para el RAFA parte 1
Fuente. Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

Altura del reactor (m)	$H = H_{sup} + H_{inf} + b$
	Hsup = Altura espacio superior (m)
	Hinf = Altura espacio inferior (m)
	b = Borde libre (m)
Ancho del reactor (m)	$a = \frac{V}{H * l}$
	V = Volumen del reactor (m3)
	H = Altura del reactor (m)
	l = Largo del reactor (m)
Largo del reactor (m)	$l = \frac{V}{H * a}$
	V = Volumen del reactor (m3)
	H = Altura del reactor (m)
	a = Ancho del reactor (m)
Velocidad de flujo ascendente (m/h)	$Vel = \frac{H}{TRH}$
	H = Altura del reactor (m)
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
Área superficial (m2)	$A_s = \frac{TRH * Q}{H}$
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
	Q = Caudal de Diseño (m3/h)
	H = Altura del reactor (m)
Cantidad de orificios	$C_{orf} = \frac{A_s}{A_{orf}}$
	As = Área superficial (m2)
	Aorf = Área para disponer cada orificio (m2)

Tabla 83. Guía de cálculo para el RAFA parte 2

Fuente. Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

Caudal por orificio (L/s)	$Q_{orf} = \frac{Q}{C_{orf}}$
	Q = Caudal de Diseño (L/s)
	Corf = Cantidad de orificios
Carga Hidráulica Volumétrica (m ³ /m ³ *h)	$CHV = \frac{Q}{V}$
	Q = Caudal de diseño (m ³ /h)
	V = Volumen del reactor (m ³)
Concentración sustrato en el influente (kg DBO/m ³)	$C_I = \frac{C_o * V}{Q}$
	Co = Carga orgánica aplicada (kg DQO/m ³ *d)
	V = Volumen del reactor (m ³)
	Q = Caudal de diseño (m ³ /d)
Velocidad de flujo en la campana (m/h)	$Vel_{fc} = Vel * 4$
	Vel = Velocidad de flujo ascendente (m/h)
DBO Efluente (mg/L)	$DBO_{ef} = S_0 - \frac{E * S_0}{100}$
	So = DBO Afluente (mg/L)
	E = Eficiencia del reactor (%)
SST Efluente (mg/L)	$SST_{ef} = S_0 - \frac{E * S_0}{100}$
	So = SST Afluente (mg/L)
	E = Eficiencia del reactor (%)

Tabla 84. Guía de cálculo para el RAFA parte 3

Fuente. Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

SEPARADOR GSL	
Velocidad de agua en la garganta (m/h)	$Vel_g = Vel_{fc}$
	Vel fc = Velocidad de flujo en la campana (m/h)
Volumen de sedimentación (m3)	$V_s = V * 0,15$
	V = Volumen del reactor (m3)
	E = Eficiencia del reactor (%)
Área superficial (m2)	$A_{S\ GSL} = A_s * 0,15$
	As = Área superficial (m2)

Tabla 85. Guía de cálculo para el RAFA – Separador GSL

Fuente: Autores con base en el Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

RAFA	
PARÁMETROS DE DISEÑO	
TRH (h)	6.00
QMH (m3/h)	770.40
Q (m3/d)	18489.60
Espacio inf (m)	4.00
Espacio sup (m)	1.50
Borde libre (m)	0.40
Carga Orgánica Aplicada (kg DQO/m3*d)	3.00
DBO5 Afluente (mg/L)	220.03
SST Afluente (mg/L)	114.25

Tabla 86. Diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente parte 1.

Fuente. Autores

DIMENSIONAMIENTO		
RAFA	Vol reactor (m3)	4622.40
	H reactor (m)	5.90
	a reactor (m)	26.12
	l reactor (m)	30
	Vel de flujo ascendente (m/h)	0.98
	Área superficial (m2)	783.46
	Carga Hidráulica Volumétrica (m3/m3*h)	0.17
	Concentración sustrato en influente (kg DQO/m3)	0.75
	Velocidad flujo en la campana (m/h)	3.93
	DBO5 efluente (mg/L)	55.01
	SST Efluente (mg/L)	34.27
GSL	Inclinación paredes (grados)	60.00
	Tasa de carga superficial (m/h)	0.70
	Velocidad de agua en la garganta (m/h)	3.93
	Volumen de sedimentación (m3)	693.36
	Área superficial (m2)	117.52
	Altura colector de gas (m)	2.00
	Traslado de pantallas de campana (m)	0.15

Tabla 87. Diseño del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente parte 2.
Fuente. Autores.

El título E del RAS dicta en su numeral E.4.7.7.7 el control de olores que se debe efectuar en esta tecnología de tratamiento, entrado en operaciones el reactor debe ser tapado, así como recoger y tratar los gases generados en zonas de sedimentación, así como en las estructuras de salida y conducción del efluente. Es importante informar a los operarios acerca del riesgo por explosión en presencia de fuego en las instalaciones, por lo cual debe prohibirse fumar en las inmediaciones de la planta.

En un reactor RAFA operativo se debe realizar el monitoreo de diferentes parámetros (Minvivienda, 2017):

- pH (alcalinidad): se debe llevar a cabo control acerca de los niveles de alcalinidad presente, de modo que si está descendiendo, se agreguen especies básicas y evitar así colapso por acidificación del medio. El valor mínimo recomendado para el pH es de 6.5.
- Generación de gases: El mantenimiento constante de las estructuras de recolección de gases es fundamental para asegurar la minimización de potenciales impactos en el área de influencia de la planta. Se requiere verificar y corroborar la inexistencia de fugas.

- Cantidad de lodo efluente: se debe monitorear la cantidad de sólidos en el efluente del reactor con el fin de controlar la cantidad de biomasa. Si el contenido de los sólidos es mayor a 60 mg/L, se hace necesario comprobar el funcionamiento hidráulico del sedimentador aguas arriba.

15.3.5.6 Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

Es la opción predilecta para efectuar tratamiento al efluente generado por un RAFA. En los FAFA, el material orgánico se ve degradado por acción de la biomasa activa que se encuentra adherida a la superficie del filtro, a medida que el fluido se desplaza a través de este, con una eficiencia de remoción de la DBO entre 65 - 80% y SST entre 60 - 70 % a diferencia del RAFA, esta tecnología no requiere de energía eléctrica para su operación, contando igualmente con una baja producción de lodos, es idóneo para comunidades con alta tasa de descargas de aguas negras y grises. Es necesario contar con operarios capacitados para monitorear el correcto funcionamiento y mantenimiento del filtro para evitar exceso de malos olores. Esta tecnología puede requerir de 6 a 9 meses para alcanzar su capacidad de tratamiento tope, debido a que la biomasa anaerobia se caracteriza por un crecimiento lento al igual que su adecuación al medio del filtro. Para reducir este tiempo es posible la inoculación de bacterias anaerobias por medio de la aspersión de lodos generados en los tratamientos biológicos antecesores en el filtro. Se debe tener en cuenta que el equilibrio biológico de este medio es frágil y por ende se debe abstenerse de descargar cualquier tipo de compuesto químico fuerte, con el tiempo la eficiencia del filtro irá decayendo consecuencia del taponamiento de los poros por el excesivo crecimiento de la masa biológica, así como presencia de sólidos. En ese punto el filtro requerirá ser limpiado, una forma de llevarlo a cabo es poniendo el sistema en retrolavado o simplemente al remover y hacer limpieza al material del filtro; por lo anterior este sistema debe ser monitoreado constantemente para verificar el correcto funcionamiento, llevando además un control acerca de los niveles de espuma y lodos. Rittman (2011) recomienda que el pH dentro del filtro se mantenga en el intervalo comprendido de 6.6 a 7.6, debido a que valores fuera de este rango pueden afectar el proceso, a pH menores de 6, la acción de los ácidos grasos puede inhibir a las bacterias formadoras de metano, mientras que a pH superior a 8 son generados iones tóxicos para el proceso. Las especies químicas que pueden ser utilizadas para mantener un pH saludable son: cal, bicarbonato de sodio (NaHCO_3) o hidróxido de sodio (NaOH) (Ritmann, 2011).

El diseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente fue efectuado conforme a la siguiente guía de cálculo.

Concepto	Ecuación de diseño
Volumen del filtro, m ³	$V = Q * TRH$
	Q = Caudal de Diseño (m ³ /d)
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (d)
Altura del filtro, en m	$H = d + h + b$
	d = Distancia libre en el fondo (m)
	h = Altura del medio de empaque (m)
	b = Borde libre (m)
Área del filtro, en m ²	$A = \frac{V}{H}$
	V = Volumen del filtro (m ³)
	h = Altura del filtro (m)
Volumen del medio filtrante, en m ³	$Vmf = A * h$
	A = Área del filtro (m ²)
	h = Altura del medio de empaque (m)
Verificación Carga Hidráulica Superficial, en m ³ /m ² *d	$CHS = \frac{Q}{A}$
	Q = Caudal de Diseño (m ³ /d)
	A = Área del filtro (m ²)
Verificación Carga Orgánica Volumétrica, en kg DBO/m ³ *d	$COV = \frac{Q * S_0}{V}$
	Q = Caudal de Diseño (m ³ /d)
	S ₀ = DBO del afluente (mg/L)
	V = Volumen del filtro (m ³)

Tabla 88. Guía para el cálculo del FFAFA parte 1
Fuente. Autores con base en CONAGUA (2016)

Remoción del filtro anaerobio, en porcentaje	$E = 100(1 - 0,87(TRH)^{-0,5})$
	TRH = Tiempo de Retención Hidráulica (h)
Estimación DBO en el efluente, en mg DBO/L	$DBO_{ef} = S_0 - \frac{E * S_0}{100}$
	So = DBO del afluente (mg/L)
	E = Eficiencia del filtro anaerobio (%)

Tabla 89. Guía para el cálculo del Fafa parte 2
Fuente: Autores con base en CONAGUA (2016)

FAFA	
PARÁMETROS DE DISEÑO	
TRH (d)	0.25
TRH (h)	6
Caudal de Diseño (m3/d)	18489.6
DBO afluente (kg DBO/m3)	0.05
DBO Afluente (mg/L)	55.01
SST Afluente (mg/L)	34.27
DIMENSIONAMIENTO	
Volumen del filtro (m3)	4622.40
Distancia libre en el fondo (m)	0.60
Altura del medio de empaque (m)	2.00
Borde libre (m)	0.85
H total filtro (m)	3.45
A filtro (m2)	1339.83
Vol medio filtrante (m3)	2679.65
Verificación CHS (m3/m2*d)	13.80
Verificación COV (kg DBO/m3*d)	0.20
Verificación COVmf (kg DBO/m3*d)	0.35
l del filtro (forma cuadrada) (m)	36.60
Eficiencia DBO (%)	64.48
Eficiencia SST (%)	65
DBO Efluente (mg/L)	19.54
SST Efluente (mg/L)	12.0

Tabla 90. Diseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
Fuente. Autores

15.3.6 Control de olores en la planta

En cualquier planta que cuente con sistemas de tratamiento anaerobio debe cumplirse un mínimo de acciones para el control de olores ofensivos que puedan degradar la calidad del aire, con miras de proteger la salud y la calidad de los espacios de trabajo de los operarios, las personas que transiten por el lugar y los ecosistemas. Con base en lo dispuesto en el artículo 209 del RAS, 2017, el plan de contingencia de olores ofensivos se debe desarrollar en conformidad con las disposiciones establecidas en la Resolución 1541 de 2013 acerca de niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, así como en lo dispuesto por el MADS para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos, por todo lo anterior, deben ser contempladas las siguientes medidas al llevar a cabo una implementación de una PTAR (MINVIVIENDA, 2017):

1. Realizar confinamiento y cobertura de procesos en áreas de tratamiento preliminar o en sedimentadores primarios.
2. Evaluar la captación y tratamiento de emisiones odoríferas ofensivas para el entorno de la planta.
3. Reducir al mínimo el tiempo de retención de los lodos en el sedimentador primario y el secundario.
4. Adicionar caudales recirculados odoríferos tan próximos como sea posible a los procesos aeróbicos de tratamiento secundario.
5. Agrupar las fuentes principales de olor cuando sea posible, para permitir el uso de medidas de reducción comunes.
6. Utilizar barreras vivas y plantas aromatizantes.
7. Minimizar la turbulencia y evitar caídas en la línea hidráulica.
8. Buscar que se produzcan sumergencias en las tuberías que conecten los diferentes procesos del reactor.

15.3.7 Tratamiento y Aprovechamiento del biogás generado

Debido a la considerable generación de metano (CH_4) en los tratamientos biológicos que fueron seleccionados, como es mencionado en la literatura, y el alto potencial de este como gas de efecto invernadero, toda porción no aprovechada del biogás debe pasar por un proceso de incineración con el objeto de transformarlo en Dióxido de Carbono (CO_2). También, su aprovechamiento es factible debido al alto poder calorífico que posee. Se debe efectuar un análisis costo-beneficio para determinar la viabilidad del proyecto.

15.3.8 Personal

Con base en lo dispuesto en el numeral E.6.2 del título E del RAS, 2000, solo son aptos para entrar en operaciones aquellos trabajadores que su estado de salud previo haya sido dictaminado por un médico con autorización. De presentarse necesario, deberán ser prescritos exámenes preventivos de manera periódica. Todos los operarios deberán tomar una capacitación básica, que debe contener como mínimo lo siguiente (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000):

1. Visión general de los parámetros que se analizarán.
2. Capacitación para la toma de muestras específicas según parámetro.
3. Ensayo en la matriz correspondiente, siguiendo las instrucciones de manejo para cada parámetro del procedimiento (ejecución y manejo propio).

4. Indicación de los peligros que encierra el uso de productos químicos, haciendo referencia al empleo del equipo de protección personal (por ejemplo, anteojos y guantes de protección) y a los primeros auxilios.
5. Evacuación de los desechos y las aguas residuales.

La capacitación de cada función en particular deberá ser evaluada para hacer la inducción correspondiente para cada escenario de trabajo. Es necesaria la presencia de un supervisor de salud ocupacional que esté encargado de comunicar las zonas de peligro con las respectivas señalizaciones, verificar constantemente que los trabajadores utilicen y hagan buen uso de los elementos de protección personal, estar al tanto del adecuado funcionamiento de los equipos así como de su mantenimiento y asegurar que la ubicación de elementos de seguridad como botiquines, extintores, alarmas, y líneas de comunicación se encuentren en lugares visibles y de fácil acceso para todo operario.

16 Conclusiones

- La información disponible que fue obtenida en documentos oficiales municipales, documentos de proyectos de grado con similitudes y la literatura referente al municipio de Pacho en general, fue suficiente para sentar una línea base sólida que sirvió como insumo para el adecuado desarrollo de los objetivos posteriores.
- Mediante la comparación de las concentraciones en los puntos de vertimiento priorizados por el PSMV municipal del año 2017, los cuales descargan a los afluentes río Rute y Batán, cuerpos hídricos principales de la cabecera municipal con la Resolución 631 del 2015, fue demostrado de manera cuantificable y gráfica la necesidad de la construcción de una Planta de Tratamiento del Agua Residual y la importancia que se le debe dar a la ejecución de este proyecto por parte de las entidades administrativas territoriales dentro del Plan de Desarrollo tanto actual como futuros.
- La visita técnica permitió corroborar de manera presencial la problemática que padece Pacho a nivel de Casco Urbano consecuencia de la degradación del recurso hídrico, así mismo, a través de la entrevista con funcionarios del Acueducto Local y de la Alcaldía fueron transmitidas las dificultades a nivel legal debido a las multas en las cuales incurren ante la autoridad ambiental competente (CAR de Cundinamarca) consecuencia de las descargas de vertimientos de aguas residuales crudas a los cuerpos superficiales existentes, como también la complejidad para la construcción de una PTAR en relación con presupuestos limitados, necesidad de la capacitación del recurso humano, obtención de un predio que cumpla con las características dispuestas en la normativa (RAS, 2017) etc. Por todo lo anterior fue comprendida la importancia de llevar a cabo visitas técnicas en el desarrollo de un proyecto de grado, ya que esto otorga una visión más clara a los investigadores del contexto en el cual se están involucrando.
- Fue evidenciable que a pesar de la falta de los recursos, instrumentos y espacios para llevar a cabo caracterizaciones de las aguas residuales, la ejecución de este tipo de proyectos es tangible si existen estudios recientes acerca de la calidad del agua en documentos oficiales, con validez técnica, realizada por profesionales con las facultades y certificaciones necesarias para esta clase de ensayos, como lo es en el escenario que abarca este proyecto de investigación, gracias a las caracterizaciones efectuadas para el PSMV del año 2017 por parte de Empresas Públicas de Cundinamarca S.A. E.S.P.

- La caracterización de los vertimientos demuestra que los mismos poseen un mayor aporte de material orgánico (DBO) en comparación con el químico (DQO) en las descargas, consecuencia de esto, los tratamientos biológicos, conocidos por su alta eficiencia en la remoción de cargas de DBO, son las opciones que mejor se ajustan para el contexto que se presenta, siendo tecnologías de este tipo las seleccionadas para el diseño del tratamiento secundario. Debido a la alta capacidad de generación de biogás por cuenta del tratamiento biológico anaerobio y el potencial de uso de este para el aprovechamiento energético, la oportunidad de hacer un uso productivo de este subproducto se consolida como una posibilidad.
- A partir del conocimiento de los residuos generados en esta clase de sistemas, tales como la fracción de gas metano que no se plantea aprovechar, o el efluente de lodos, fueron planteadas acciones para efectuar la adecuada gestión de estos desechos, ya que esto evita incurrir en problemáticas consecuencia de la inadecuada gestión de los residuos.
- La metodología para la selección de tecnologías de tratamiento que fue utilizada para el desarrollo del tercer objetivo, aportó una visión más clara sobre los atributos que se deben tener en cuenta para la selección de estas, en los diferentes niveles (técnico, económico y ambiental), y la relación que deben tener las eficiencias de remoción de los equipos con la composición de las aguas residuales municipales y la calidad que se requiere en el agua residual tratada por la planta, de modo que sean seleccionadas las tecnologías más afines para cumplir con el objetivo de presentar un sistema de tratamiento de aguas residuales, que sea eficiente y sustentable para las condiciones presentadas en el municipio y así proponer una solución a la degradación del recurso hídrico en los principales afluentes del Casco Urbano (río Rute y Batán).
- La evaluación de las amenazas que puede sufrir una planta es fundamental para el adecuado diseño de la misma, donde se constató la importancia de tener en cuenta los niveles máximos de caudal que pueden acontecer en eventos de intensa lluvia de modo que el aliviadero diseñado permita la entrada de un flujo de nivel constante, protegiendo así los equipos consecuentes a este. Dichos equipos igualmente fueron diseñados tomando en cuenta el mayor caudal (Caudal Máximo Horario) y así solventar cualquier complicación inherente a eventos atípicos externos al sistema. Otras amenazas a tener en cuenta son las referentes a la topografía del terreno, comunidades y ecosistemas cercanos, las cuales fueron tomadas en cuenta para evaluar el sitio propuesto para erigir la planta por el PSMV, 2017.
- Los manuales para la correcta operación y mantenimiento de las plantas son herramientas de gran importancia para el adecuado funcionamiento del sistema, otorgando al operador un referente de consulta para llevar a cabo sus acciones de manera acertada, respetando las bases establecidas en la normativa (RAS, 2017).

17 Recomendaciones

- La eficiencia de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales está en función del estado de sus equipos y de la frecuencia y adecuado mantenimiento, por lo que es fundamental realizar su operación en conformidad con lo dispuesto en el Manual de Operación y Mantenimiento, que toda planta de este tipo debe tener actualizado. Para cerciorarse de lo anterior, es vital planificar monitoreos periódicos con el objeto de determinar el nivel de eficiencia al cual está funcionando el sistema en comparación con los niveles teóricos consolidados en el diseño.
- Está planta fue diseñada para operar por un periodo de diseño equivalente a 25 años debido a la complejidad media-alta existente en la cabecera municipal de Pacho, una vez culminado este periodo deberán ser evaluadas las condiciones existentes a nivel de crecimiento demográfico, actividades económicas y dotaciones, así como una evaluación de la planta para poder determinar las adecuaciones necesarias para mantener una eficiencia de remoción suficiente, en armonía con la normatividad vigente.
- Si se dispone con los recursos suficientes, se recomienda para proyectos de este tipo realizar caracterizaciones en los puntos de descarga de aguas residuales, incluso si se tiene información suministrada por parte de documentos oficiales, de modo que sea posible hacer una comparación de los resultados obtenidos. Se debe recordar que las caracterizaciones deben ser efectuadas por un laboratorio certificado por el IDEAM para ser válidos en un estudio que se incluya en la formulación de un proyecto a escala real.
- Toma importancia hacer un análisis de costos al momento de contar con los precios de los materiales, equipos estructurales y personales, maquinarias, mano de obra, previsión de costos por demanda de repuestos, así como demás costos inherentes a la instalación del sistema, debido a que al momento de llevar los proyectos a su implementación, los costos de prefactibilidad se distancian ampliamente de la realidad al ser estas variables altamente complejas de modelar en el marco de la formulación de los proyectos.
- Debido al nivel relativamente alto de complejidad en la operación y mantenimiento de los equipos de tratamiento biológico, es necesario que los operarios antes de iniciar actividades tengan una capacitación previa, de modo que estos obtengan las capacidades conceptuales y prácticas para mantener el correcto funcionamiento de estas tecnologías, ya que además de la eficiencia, de ello depende que se evite la excesiva emisión de olores ofensivos, así como la alta generación de lodos, inconvenientes que suelen presentarse con frecuencia en plantas de tratamiento que poseen sistemas de tratamiento biológico anaerobio, si no se tienen las precauciones necesarias.
- El biogás generado por medio de la operación de un tratamiento biológico de este tipo, al componerse en su gran mayoría de metano (55 - 70% CH₄), tiene el riesgo de causar explosiones al mezclarse este con el aire, por lo cual es vital estar al tanto de la correcta captura de este y llevar a cabo su incineración, transformándolo así en dióxido de carbono. Una fracción del biogás se puede aprovechar para generación energética, cuando el análisis costo-beneficio de llevar esto a cabo sea favorable.
- Cobra importancia el tener un control preciso a la hora de efectuar la adición de especies químicas tales como la cal, bicarbonato de sodio (NaHCO₃) o hidróxido de sodio (NaOH) para mantener el pH de los equipos en sus intervalos óptimos, ya que una sobredosificación de estos puede conllevar la precipitación en exceso de los carbonatos de calcio que son formados mediante el proceso

- El uso de los Elementos de Protección Personal (EPP) en cada una de las operaciones realizadas dentro de la planta y a lo largo de la permanencia de los operarios en la misma tiene gran importancia, debido a que los lodos generados en la operación de los equipos poseen una alta cantidad de organismos patógenos, existiendo la posibilidad que, por inadecuado manejo de estos, los ambientes resulten contaminados. Esto cobra especial importancia cuando se haga necesario hacer mantenimiento a las estructuras. Lo anterior aclara que el manejo de los lodos residuales para su traslado a sitios de disposición adecuados debe ser llevado a cabo de manera cuidadosa y en conformidad al Manual de Operación y Mantenimiento.

El proyecto planteado busca el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales, teniendo como principal enfoque la ingeniería y los conceptos de salud pública, de ser posible su implementación en el municipio mitigaría la incidencia del hombre en los cuerpos de agua presentes y le conlleva el ahorro millonario a la empresa que ofrece el servicio público de alcantarillado evitando las multas que actualmente pagan por tasas retributivas y sanciones.

18 Referencias Bibliográficas.

- Alvarez-Vazquez, H., Jefferson, B., & Judd, S. J. (2004). Membrane bioreactors vs conventional biological treatment of landfill leachate: a brief review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 79(10), 1043-1049.
- ArcGIS Resources. (s. f.). Georreferenciación y sistemas de coordenadas. Recuperado de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm>
- APHEO, (S. F.). Population Growth. Recuperado de <http://core.apheo.ca/index.php?pid=61>
- Buscar Pasaje (2019). BOGOTÁ, CUNDINAMARCA A PACHO, CUNDINAMARCA. Recuperado de <http://buscarpasaje.com/detalle-ruta/480/BOGOTA,CUNDINAMARCA-PACHO,CUNDINAMARCA>
- CAR (2009). *Resolución 3461 de 2009 - Objetivos de calidad para la cuenca del Rio Negro 2020*.
- Cervantes-Carrillo, F., Pérez, J., & Gomez, J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(2), 73-82.
- Consejo Municipal de Pacho. (2016). *Plan De Desarrollo Municipio de Pacho. Oportunidades y Progreso Para Todos 2016 - 2019*. Recuperado de http://pachocundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/pachocundinamarca/content/files/000022/1075_oportunidades-y-progreso-para-todos.pdf
- Chapra, S. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*.
- Empresas Públicas de Cundinamarca (2017). *PSMV Casco Urbano, Municipio de Pacho, Cundinamarca 2017*. Recuperado de http://pachocundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/pachocundinamarca/content/files/000084/4177_informe-complementario-psmv--pacho.pdf
- Empresas Públicas de Cundinamarca (2018). *PSMV Casco Urbano, Municipio de Pacho, Cundinamarca*.

- ESRI. (2019). ArcGIS for Personal Use. Recuperado de <https://esri.co/arcgis-personal-use/>
- DANE (1951). CENSO DE POBLACIÓN DE 1951: DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA. Recuperado de <http://biblioteca.dane.gov.co/biblioteca/categorias/43/>
- DANE (2017). *Reporte categorización de municipios y departamentos 2018*.
- Galeano, L. y Muñoz, K (2016). *PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL POR ZANJÓN DE OXIDACIÓN PARA EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ -SANTANDER*.
- IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua. Capítulo 6: Calidad del Agua Superficial en Colombia. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP6.pdf>
- Lenntech. (2019). *Glosario del Agua*. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/filespdf/doc_pdf_8439.pdf
- López, C., & Alfredo, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Lozano-Rivas, W. (2012). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Universidad Piloto de Colombia.
- MADS (2015). *Planificación de cuencas hidrográficas – Macrocuencas*.
- Medina, G. (2012). *DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE MACANAL, BOYACÁ*. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2651/Medinagerman2012.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Mercado Libre (2019). Cámara Fotográfica Fujifilm. Recuperado de https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-501348298-camara-fotografica-fujifilm-_JM
- Metcalf, A., & Eddy, J. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento y reutilización*. McGraw Hill: México.
- MinAmbiente (2007). *Decreto 2115 de 2007. Instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*.
- Minambiente (2015). *Resolución 631 de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales*.
- MINDESARROLLO. (2000). TÍTULO E: TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). DOCUMENTACIÓN TÉCNICO NORMATIVA DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_a_.pdf
- Minvivienda. (2014). TÍTULO B: SISTEMAS DE ACUEDUCTO. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO B%20030714.pdf>
- Minvivienda. (2016). TÍTULO D: Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf
- Minvivienda (2017). *Resolución 330 de 2017 - Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2017*.
- Miranda, J. P. R., Ubaque, C. A. G., & Pinzón, J. P. (2015). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. *Tecnura*, 19(46), 149-164.
- Núñez, L. (2014). *Análisis de riesgo sanitario en aguas grises de la provincia de Buenos Aires, Argentina*.

- PBOT Alcaldía municipal de Pacho (2000). Plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de Pacho 2000, Documento técnico. Recuperado de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/pacho%20pbot.pdf>
- Pinzón C, González D (2015). *DISEÑO DE UNA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO A LAS AGUAS RESIDUALES POR LAGUNAS DE OXIDACIÓN EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PACHO – CUNDINAMARCA*.
- Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49
- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, 1(1), 8-15.
- Romero Rojas, J. A. (2008). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sampieri, H., Collado, F., & Lucio, B. (2014). *Metodología de la investigación*. sexta edición McGraw-hill.
- Schoenberger H. (2009). *Integrated pollution prevention and control in large industrial installations on the basis of best available techniques - The Sevilla Process*. *Journal of Cleaner Production*, 1526-1529.
- SketchUp. (2019). Plans and Pricing. Recuperado de <https://www.sketchup.com/es/plans-and-pricing>
- TILLEY, E., ULRICH, L., LÜTHI, C., REYMOND, P., SCHERTENLEIB, R., & ZURBRÜGG, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Dübendorf (Suiza): Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática (Eawag), 2da. edición revisada.