

**PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN TÉCNICO-AMBIENTAL PARA EL ACUEDUCTO  
REGIONAL ARABIA EN EL MUNICIPIO DE VIOTÁ, CUNDINAMARCA**

Natalia Lorena Ávila Iglesias, Daniela Alejandra Parada Niño

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

Directora  
Claudia Patricia Gómez Rendón

Área de investigación, Ingeniería Socio-Técnica  
Línea de investigación, Manejo integrado del recurso hídrico & Gestión para el desarrollo urbano  
y rural y mejoramiento de la calidad de vida

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2018

## **DEDICATORIA**

*A nuestras familias que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo y finalización de nuestra carrera profesional con éxito, brindándonos valores que han sido importantes para el cumplimiento de esta meta.*

## AGRADECIMIENTOS

*Muy especialmente a nuestros padres por permitirnos estudiar y brindarnos los acompañamientos necesarios, por su paciencia y amor en este trayecto tan importante.*

*A la señora Livia Iglesias por su colaboración y seguimiento en la realización de nuestro proyecto.*

*Agradecemos de manera especial a la Empresa de Servicios Públicos de Viotá y al personal administrativo del Acueducto Regional Arabia por compartirnos su conocimiento y el debido acompañamiento en nuestro trabajo de campo*

*De igual manera a la docente Claudia Patricia Gómez Rendón, Directora del Proyecto de grado y a la planta docente que hizo parte de nuestra formación*

## Tabla de contenido

|           |                                           |    |
|-----------|-------------------------------------------|----|
| 1.        | Resumen .....                             | 8  |
| 2.        | Abstract .....                            | 8  |
| 3.        | Introducción .....                        | 8  |
| 4.        | Planteamiento del problema.....           | 9  |
| 4.1.      | Pregunta de investigación.....            | 10 |
| 4.1.1.    | Sub-preguntas de investigación .....      | 10 |
| 5.        | Justificación .....                       | 10 |
| 6.        | Objetivos.....                            | 11 |
| 6.1.      | Objetivo General.....                     | 11 |
| 6.2.      | Objetivos Específicos .....               | 11 |
| 7.        | Marcos de Referencia.....                 | 11 |
| 7.1.      | Perspectiva Teórica.....                  | 11 |
| 7.1.1.    | Estado del Arte .....                     | 11 |
| 7.1.2.    | Marco Teórico .....                       | 14 |
| 7.2.      | Marco Conceptual .....                    | 16 |
| 7.2.1.    | Partes de un acueducto .....              | 16 |
| 7.2.1.1.  | Fuente de abastecimiento .....            | 16 |
| 7.2.1.2.  | Captación .....                           | 16 |
| 7.2.1.3.  | Bocatomas.....                            | 17 |
| 7.2.1.4.  | Desarenador.....                          | 17 |
| 7.2.1.5.  | Conducción.....                           | 18 |
| 7.2.1.6.  | Tratamiento del agua .....                | 18 |
| 7.2.1.7.  | Sedimentación.....                        | 18 |
| 7.2.1.8.  | Filtración.....                           | 18 |
| 7.2.1.9.  | Ablandamiento.....                        | 18 |
| 7.2.1.10. | Cloración .....                           | 18 |
| 7.2.1.11. | Tanque de almacenamiento .....            | 19 |
| 7.2.1.12. | Distribución .....                        | 19 |
| 7.2.2.    | Tipos de plantas de potabilización.....   | 19 |
| 7.2.2.1.  | Plantas de filtración rápida .....        | 19 |
| 7.2.2.2.  | Planta de filtración rápida completa..... | 20 |

|          |                                                                                                                             |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2.2.3. | Filtración directa .....                                                                                                    | 20 |
| 7.2.2.4. | Plantas de filtración lenta .....                                                                                           | 20 |
| 7.2.3.   | Calidad del agua.....                                                                                                       | 20 |
| 7.2.3.1. | Análisis físicos y químicos del agua .....                                                                                  | 21 |
| 7.2.3.2. | Análisis microbiológico.....                                                                                                | 24 |
| 7.3.     | Marco Geográfico .....                                                                                                      | 25 |
| 7.3.1.   | División político-administrativa .....                                                                                      | 26 |
| 7.3.2.   | Climatología .....                                                                                                          | 27 |
| 7.3.3.   | Pisos Térmicos .....                                                                                                        | 28 |
| 7.3.4.   | Hidrología.....                                                                                                             | 28 |
| 7.3.5.   | Geología .....                                                                                                              | 28 |
| 7.3.6.   | Geomorfología .....                                                                                                         | 29 |
| 7.3.7.   | Salud                                                                                                                       | 29 |
| 7.4.     | Marco Normativo .....                                                                                                       | 32 |
| 8.       | Metodología .....                                                                                                           | 33 |
| 8.1.     | Diseño Metodológico.....                                                                                                    | 33 |
| 8.2.     | Metodología de la investigación.....                                                                                        | 34 |
| 8.2.1.   | Evaluación preliminar.....                                                                                                  | 34 |
| 8.2.2.   | Desarrollo de alternativas .....                                                                                            | 35 |
| 9.       | Resultados .....                                                                                                            | 54 |
| 9.1.     | Resultados Objetivo 1. Diagnostico de estado actual de la capacidad y el funcionamiento del acueducto Regional Arabia ..... | 54 |
| 9.2.     | Resultados Objetivo 2. Identificar las metodologías aplicables a la optimización del acueducto. ....                        | 57 |
| 9.3.     | Resultados Objetivo 3. Estimar el presupuesto de la optimización del Acueducto Regional Arabia                              | 85 |
| 10.      | Análisis y Discusión de resultados .....                                                                                    | 86 |
| 11.      | Conclusiones .....                                                                                                          | 93 |
| 12.      | Recomendaciones .....                                                                                                       | 94 |
| 13.      | Bibliografía.....                                                                                                           | 95 |

## Lista de Tablas

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1. Características físicas del agua .....</i>                                                                     | <i>21</i> |
| <i>Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana... 21</i>                     | <i>21</i> |
| <i>Tabla 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana..... 22</i>                            | <i>22</i> |
| <i>Tabla 4. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud..... 24</i>   | <i>24</i> |
| <i>Tabla 5. Características microbiológicas del agua..... 25</i>                                                           | <i>25</i> |
| <i>Tabla 6. Climatología del municipio de Viotá..... 27</i>                                                                | <i>27</i> |
| <i>Tabla 7. Morbilidad por consulta externa - Edad de 1 a 4 años..... 31</i>                                               | <i>31</i> |
| <i>Tabla 8. Morbilidad por consulta externa - Edad de 5 a 14 años..... 31</i>                                              | <i>31</i> |
| <i>Tabla 9. Morbilidad por consulta externa - Edad de 60 y más años..... 32</i>                                            | <i>32</i> |
| <i>Tabla 10. Normatividad..... 32</i>                                                                                      | <i>32</i> |
| <i>Tabla 11. Diagnóstico..... 35</i>                                                                                       | <i>35</i> |
| <i>Tabla 12. Análisis de Alternativas de sistemas de potabilización..... 36</i>                                            | <i>36</i> |
| <i>Tabla 13. Parámetros de evaluación..... 36</i>                                                                          | <i>36</i> |
| <i>Tabla 14. Dotación por suscriptor según la altura sobre el nivel del mar ..... 38</i>                                   | <i>38</i> |
| <i>Tabla 15. Parámetro por medir para determinar la calidad del agua de la fuente ..... 40</i>                             | <i>40</i> |
| <i>Tabla 16. Desarrollo Análisis Metodológico..... 52</i>                                                                  | <i>52</i> |
| <i>Tabla 17. Resultados trabajo de campo ..... 54</i>                                                                      | <i>54</i> |
| <i>Tabla 18. Análisis de calidad del agua entregada por la administración del Acueducto Regional Arabia - 2015..... 56</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 19. Análisis de calidad del agua realizado por el Laboratorio Analquim - 2018..... 56</i>                         | <i>56</i> |
| <i>Tabla 20. Cálculo para proyecciones según el nivel de complejidad ..... 57</i>                                          | <i>57</i> |
| <i>Tabla 21. Resultado consumo horario..... 71</i>                                                                         | <i>71</i> |
| <i>Tabla 22. Condiciones de mezcla para filtros ..... 78</i>                                                               | <i>78</i> |
| <i>Tabla 23. Tabla de valores grava de soporte ..... 79</i>                                                                | <i>79</i> |
| <i>Tabla 24. Presupuesto General ..... 85</i>                                                                              | <i>85</i> |
| <i>Tabla 25. Parámetros físico químicos ideales para la filtración directa ..... 90</i>                                    | <i>90</i> |
| <i>Tabla 26. Especificaciones de los productos de compra..... 93</i>                                                       | <i>93</i> |

## Lista de Ilustraciones

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Ilustración 1. Ubicación del Municipio de Viotá.....</i>                        | <i>26</i> |
| <i>Ilustración 2. División político-administrativa de Viotá.....</i>               | <i>27</i> |
| <i>Ilustración 3. Resultados encuesta de satisfacción sector San Gabriel .....</i> | <i>29</i> |
| <i>Ilustración 4. Cobertura Servicio de Acueducto.....</i>                         | <i>30</i> |
| <i>Ilustración 5. Evaluación preliminar.....</i>                                   | <i>34</i> |
| <i>Ilustración 6. Desarrollo de alternativas.....</i>                              | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 7. Rejilla .....</i>                                                | <i>63</i> |
| <i>Ilustración 8. Canaleta de aducción.....</i>                                    | <i>64</i> |
| <i>Ilustración 9. Bocatoma en planta.....</i>                                      | <i>65</i> |
| <i>Ilustración 10. Bocatoma en corte.....</i>                                      | <i>65</i> |
| <i>Ilustración 11. Desarenador.....</i>                                            | <i>71</i> |
| <i>Ilustración 12. Concentraciones favorables .....</i>                            | <i>90</i> |

## Lista de Ecuaciones

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Ecuación 1. Método geométrico para la proyección suscriptor.....</i>         | <i>37</i> |
| <i>Ecuación 2. Tasa de crecimiento anual.....</i>                               | <i>37</i> |
| <i>Ecuación 3. Cálculo de dotación bruta .....</i>                              | <i>38</i> |
| <i>Ecuación 4. Cálculo caudal medio diario .....</i>                            | <i>38</i> |
| <i>Ecuación 5. Cálculo caudal máximo diario .....</i>                           | <i>39</i> |
| <i>Ecuación 6. Cálculo de la presa y garganta de la bocatoma.....</i>           | <i>42</i> |
| <i>Ecuación 7. Cálculo de la altura de la lámina de agua .....</i>              | <i>42</i> |
| <i>Ecuación 8. Cálculo longitud del vertedero .....</i>                         | <i>42</i> |
| <i>Ecuación 9. Cálculo velocidad del agua .....</i>                             | <i>43</i> |
| <i>Ecuación 10. Cálculo ancho del canal de aducción.....</i>                    | <i>43</i> |
| <i>Ecuación 11. Cálculo área neta de la rejilla.....</i>                        | <i>44</i> |
| <i>Ecuación 12. Cálculo área total de la rejilla .....</i>                      | <i>44</i> |
| <i>Ecuación 13. Relación entre área neta y área total .....</i>                 | <i>44</i> |
| <i>Ecuación 14. Cálculo área total en función de la longitud.....</i>           | <i>44</i> |
| <i>Ecuación 15. Cálculo caudal a través de la rejilla .....</i>                 | <i>45</i> |
| <i>Ecuación 16. Cálculo niveles en el canal de aducción.....</i>                | <i>45</i> |
| <i>Ecuación 17. Cálculo de cámara de recolección .....</i>                      | <i>46</i> |
| <i>Ecuación 18. Cálculo área del desarenador .....</i>                          | <i>47</i> |
| <i>Ecuación 19. Cálculo velocidad del agua .....</i>                            | <i>47</i> |
| <i>Ecuación 20. Cálculo velocidad horizontal del agua.....</i>                  | <i>47</i> |
| <i>Ecuación 21. Cálculo tiempo de sedimentación .....</i>                       | <i>47</i> |
| <i>Ecuación 22. Cálculo profundidad del desarenador.....</i>                    | <i>48</i> |
| <i>Ecuación 23. Cálculo volumen del sedimentador.....</i>                       | <i>48</i> |
| <i>Ecuación 24. Cálculo comprobación del tiempo de sedimentación .....</i>      | <i>48</i> |
| <i>Ecuación 25. Cálculo comprobación velocidad horizontal.....</i>              | <i>48</i> |
| <i>Ecuación 26. Cálculo velocidad de sedimentación de la partícula.....</i>     | <i>49</i> |
| <i>Ecuación 27. Cálculo velocidad de suspensión.....</i>                        | <i>49</i> |
| <i>Ecuación 28. Cálculo velocidad de salida sobre el vertedero.....</i>         | <i>50</i> |
| <i>Ecuación 29. Cálculo alcance superior del filete de agua .....</i>           | <i>50</i> |
| <i>Ecuación 30. Cálculo pendiente de volumen de lodos .....</i>                 | <i>50</i> |
| <i>Ecuación 31. Cálculo volumen del tanque de almacenamiento .....</i>          | <i>51</i> |
| <i>Ecuación 32. Cálculo del caudal unitario .....</i>                           | <i>73</i> |
| <i>Ecuación 33. Cálculo de la profundidad crítica.....</i>                      | <i>73</i> |
| <i>Ecuación 34. Cálculo de la profundidad antes del resalto hidráulico.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Ecuación 35. Cálculo de la velocidad antes del resalto .....</i>             | <i>73</i> |
| <i>Ecuación 36. Cálculo de número de Froude .....</i>                           | <i>74</i> |
| <i>Ecuación 37. Cálculo de la profundidad después del resalto .....</i>         | <i>74</i> |
| <i>Ecuación 38. Cálculo de la velocidad después del resalto.....</i>            | <i>74</i> |
| <i>Ecuación 39. Cálculo de longitud del resalto hidráulico .....</i>            | <i>74</i> |
| <i>Ecuación 40. Cálculo de Lm.....</i>                                          | <i>75</i> |



|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Ecuación 41. Cálculo de las pérdidas de energía .....</i>                           | <i>75</i> |
| <i>Ecuación 42. Velocidad media en el resalto hidráulico .....</i>                     | <i>75</i> |
| <i>Ecuación 43. Cálculo tiempo de mezcla .....</i>                                     | <i>75</i> |
| <i>Ecuación 44. Cálculo gradiente de velocidad .....</i>                               | <i>75</i> |
| <i>Ecuación 45. Cálculo rata o tasa de filtración.....</i>                             | <i>76</i> |
| <i>Ecuación 46. Cálculo velocidad mínima .....</i>                                     | <i>76</i> |
| <i>Ecuación 47. Cálculo velocidad máxima.....</i>                                      | <i>76</i> |
| <i>Ecuación 48. Cálculo área de filtración.....</i>                                    | <i>76</i> |
| <i>Ecuación 49. Cálculo de número de filtros .....</i>                                 | <i>77</i> |
| <i>Ecuación 50. Cálculo de la forma y dimensión de los filtros .....</i>               | <i>77</i> |
| <i>Ecuación 51. Cálculo espesor del lecho filtrante .....</i>                          | <i>79</i> |
| <i>Ecuación 52. Cálculo estructura de drenaje .....</i>                                | <i>80</i> |
| <i>Ecuación 53. Cálculo de la pérdida de carga en el lecho .....</i>                   | <i>80</i> |
| <i>Ecuación 54. Cálculo de la pérdida en el agua.....</i>                              | <i>80</i> |
| <i>Ecuación 55. Cálculo de la pérdida en la antracita.....</i>                         | <i>80</i> |
| <i>Ecuación 56. Cálculo de la pérdida de carga total en el lecho.....</i>              | <i>81</i> |
| <i>Ecuación 57. Cálculo de la pérdida de carga en la grava de soporte .....</i>        | <i>81</i> |
| <i>Ecuación 58. Cálculo de la pérdida de carga en el falso fondo.....</i>              | <i>81</i> |
| <i>Ecuación 59. Cálculo del caudal por filtro .....</i>                                | <i>82</i> |
| <i>Ecuación 60. Cálculo de hf en el rango total inicial durante la filtración.....</i> | <i>82</i> |
| <i>Ecuación 61. Cálculo de hf Arena .....</i>                                          | <i>82</i> |
| <i>Ecuación 62. Cálculo de hf Antracita.....</i>                                       | <i>83</i> |
| <i>Ecuación 63. Cálculo de hf Grava.....</i>                                           | <i>83</i> |
| <i>Ecuación 64. Cálculo de hf falso fondo.....</i>                                     | <i>83</i> |
| <i>Ecuación 65 Cálculo de hf durante el lavado.....</i>                                | <i>84</i> |
| <i>Ecuación 66. Cálculo de expansión total .....</i>                                   | <i>84</i> |



## **1. Resumen**

La necesidad de la mayoría de la población del municipio de Viotá, Cundinamarca, da origen a la motivación de proveer un servicio vital como lo es el agua potable y por lo tanto la generación de la propuesta descrita en este proyecto de carácter técnico ambiental para mejorar la calidad de vida e impulsar el desarrollo rural sostenible en el municipio.

Esta investigación busca entregar a la Secretaria de Planeación del municipio de Viotá, una propuesta de optimización técnico ambiental para el acueducto Regional Arabia, que dentro de sus fines posee la característica de adaptabilidad para ser replicada en las demás veredas del municipio acondicionándola a las características de calidad del agua, línea base y condiciones técnicas. Para lo anterior se tomaron como factores determinantes la calidad del agua en el punto de captación, la línea base o las características ambientales de la vereda y su sostenibilidad que pueden llegar a afectar la calidad y disponibilidad de agua para el acueducto.

### ***Palabras claves***

Acueducto veredal, agua potable, optimización, potabilización, PTAP.

## **2. Abstract**

The need of the majority of the population of the municipality of Viotá, Cundinamarca, it gives origin to the motivation of providing a vital service since it is the drinkable water and therefore the generation of the offer described in this project of technical environmental character to improve the quality of life and to stimulate the rural sustainable development in the municipality.

This investigation seeks to deliver to Planeación's Secretariat of Viotá's municipality, an offer of optimization environmental technician for the Regional aqueduct Arabia, which inside his ends possesses the characteristic of adaptability to be answered in other paths of the municipality conditioning it to the quality characteristics of the water, line base and technical conditions. For the previous thing they took the quality of the water as determinant factors in the point of capture, the line bases or the environmental characteristics of the path and his sustainability that the quality and water availability can manage to affect for the aqueduct.

### ***Keywords***

Aqueduct veredal, potable water, optimization, potabilization, PTAP.

## **3. Introducción**

El agua es uno de los elementos más importantes en el planeta no solo por su abundancia sino por la directa dependencia de los seres vivos para poder sobrevivir, cubre

aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la Tierra y constituye entre un 50% y 90% por peso de la misma. Los primeros organismos que existieron se originaron en el agua y evolucionaron hasta que pudieron colonizar la Tierra, esta sustancia es el mayor constituyente de todos los seres vivos, estando incorporada en tejidos y órganos, tal como se puede apreciar en órganos 100% vitales como lo son el hígado y el corazón (entre un 70% y 80%) o el tejido nervioso (82% y 94%). De esta manera se reitera su papel fundamental (Gómez, 2007).

En la actualidad es preocupante que Colombia todavía no logra asegurar agua potable y saneamiento básico para todos sus habitantes, como lo propone el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6. Por ejemplo, en la zona urbana del municipio de Viotá, 97 personas de 100 pueden acceder a suministros de agua potable, mientras que en la rural sólo 74 de 100 lo logran. Sucede igual con las mejoras sanitarias, que en la zona urbana alcanzan 85,2 por ciento de acceso, mientras que en la rural tan solo el 67,9 por ciento, según la Financiera de Desarrollo Territorial (FINDETER, 2017); esto puede deberse a la existencia de una gran brecha entre las zonas urbanas y rurales del país (a favor de la urbana) (FINDETER, 2017); en municipios de cuarta, quinta y sexta categoría se encuentra más notable esta situación caso que es propio de Viotá dado que es un municipio de quinta categoría.

Colombia es un país inscrito a los tratados internacionales por lo tanto debe cumplir con los últimos Objetivos de Desarrollo Sostenible, por esto en el marco del objetivo 7, la meta 10 tiene como finalidad reducir a la mitad para 2015 el porcentaje de personas que carecen de acceso sostenible al agua potable y al saneamiento básico (Organización Mundial de la Salud -OMS, 2016). Teniendo en cuenta lo anterior se evidencia que, aun siendo una meta del año 2015 de la OMS, en Colombia todavía existen municipios como Viotá, que no cuentan con un servicio de agua potable de calidad muchas veces ni siquiera en el casco urbano.

#### **4. Planteamiento del problema**

Por tenencia familiar de finca raíz de una de las autoras del proyecto en una de las zonas abastecidas por el acueducto rural es preciso mencionar acerca de las falencias en la calidad del agua proveniente del acueducto Regional Arabia. De igual manera y según muestras bibliográficas así como el Plan de Desarrollo Municipal de Viotá 2016-2019, se puede evidenciar que se presenta un déficit del 57% en la cobertura el servicio de agua y una baja calidad ya que este acueducto no cuenta con ningún tipo de tratamiento de potabilización en las zonas rurales. Por lo tanto, el acueducto Regional Arabia en el municipio de Viotá, no cuenta con la adecuada infraestructura por lo cual no garantiza agua de calidad. Como consecuencia se identifican problemas en la salud de los habitantes arraigados a enfermedades que pueden ser de origen hídrico sobre todo en poblaciones vulnerables siendo estos niños menores de 5 años y adultos mayores de 60 años los cuales están presentando parasitosis intestinal, diarrea y gastroenteritis como algunas de las mayores asistencias médicas por consulta externa según la Alcaldía de Viotá en su Plan de Desarrollo Municipal para los años 2012 – 2015.

#### **4.1. Pregunta de investigación**

¿Qué estrategias y metodologías de optimización y mejora se pueden proponer para que el acueducto Regional Arabia tenga un óptimo funcionamiento y garantice un agua de calidad?

##### **4.1.1. Sub-preguntas de investigación**

- ¿Cuál es la incidencia de conocer el estado actual del acueducto Regional Arabia sobre la toma de decisiones hacia la optimización?
- ¿De qué manera la identificación de metodologías de optimización de acueductos influye en la selección de la alternativa de tratamiento del agua?
- ¿Cuál es el propósito de estimar el presupuesto para la optimización del acueducto?

#### **5. Justificación**

La labor del Ingeniero Ambiental se puede entender como un trabajo comunitario y socio humanístico dirigido a la conservación del mundo futuro. En la ingeniería ambiental se debe tener en cuenta las implicaciones que tienen los proyectos ambientales en la vida de las personas y en su salud para darles una mejor calidad de vida; por tanto, este proyecto se elaboró en pro de la comunidad afectada, cumpliendo la característica de ser un trabajo humanístico ya que el que hacer de un ingeniero ambiental no solo se enfoca en el carácter ecológico si no también en el ambiente como un todo.

Teniendo en cuenta lo descrito en el planteamiento del problema; brindar una propuesta de optimización del acueducto Regional Arabia para garantizar agua de calidad a los habitantes, genera una serie de beneficios ambientales, entendiendo esto como el conjunto de caracteres sociales, ecológicos y económicos como lo son la reducción del índice de enfermedades dérmicas e intestinales ya que se obtendrá agua de calidad y evitará que el municipio siga incrementando la prestación del servicio de salud, así mismo se brinda una solución a los conflictos por uso del agua para consumo; teniendo en cuenta que los acueductos comunitarios son una herramienta para mejorar la gestión en cuanto al manejo de cuencas hidrográficas e incrementa la capacidad de adaptación de los territorios al cambio climático. Alrededor de ellos se crea institucionalidad, compromiso, participación, control social, gobernabilidad del agua y además, se afianza la cultura de los pueblos. Las acciones en los acueductos comunitarios promueven sociedades autogestionarias, capaces de organizarse y de planificar sus territorios en función del agua y del desarrollo local.

## **6. Objetivos**

### **6.1. Objetivo General**

- Optimizar técnico ambientalmente el acueducto Regional Arabia en el municipio de Viotá, Cundinamarca.

### **6.2. Objetivos Específicos**

- Diagnosticar el estado actual de la capacidad y el funcionamiento del acueducto de la vereda La Magdalena.
- Identificar metodologías aplicables a la optimización del acueducto.
- Estimar el presupuesto de la optimización del acueducto.

## **7. Marcos de Referencia**

### **7.1. Perspectiva Teórica**

#### **7.1.1. Estado del Arte**

Para los fines de esta investigación se consultaron varios artículos con temáticas de: acueductos comunitarios, optimización de acueductos y plantas de tratamiento de agua potable, de igual manera este estado del arte se desarrolla de modo que los temas se presenten del contexto general a lo particular para el posterior enlace con el marco teórico. Además, se presenta a partir de una mirada a nivel de América, posteriormente se llevan a Colombia y por último a municipios con características comparables a Viotá.

#### ***Artículo 1. “Análisis de la gestión ambiental en los acueductos rurales de la Zona Norte de Costa Rica”***

La revisión de este artículo se hace por la relación directa que tiene con la gestión ambiental y la gestión integral del recurso hídrico, de igual manera atañe a la gestión con la unidad de análisis, que son los acueductos rurales. El proyecto nace en Costa Rica, donde prácticamente todos los servicios de agua potable y saneamiento son brindados por el Estado a través del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), las municipalidades y las Asociaciones de Agua Potable (ASADAS), a quienes el AyA les delega la administración de los sistemas, aunque continúan en propiedad de ese Instituto. Dicha iniciativa contribuye, desde diferentes áreas del saber, con el desarrollo y el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la región Huetar Norte de Costa Rica, por medio del incremento de la competitividad mediante la gestión ambiental en los recursos hídricos que son administrados por las ASADAS. Este modelo de gestión ambiental intenta brindar un

abordaje integral al manejo del recurso hídrico prestado por las ASADAS por medio de la educación y capacitación con respecto a la prevención del riesgo y la vulnerabilidad, el análisis químico y microbiológico, la implementación tecnológica y el manejo de corredores biológicos (Araya et al., 2010).

La metodología empleada por Araya et al., (2010) fue dividida en tres etapas. En la primera, se propuso llevar a cabo un análisis del estado de las ASADAS desde el punto de vista de los programas de gestión ambiental, para lo cual se realizó un diagnóstico. Con el fin de ejecutar esta etapa; los investigadores se dispusieron a seleccionar una muestra que fuera representativa de la zona de trabajo. Elaboraron un instrumento para recopilar la información de las ASADAS, que luego se utilizó para realizar un análisis estadístico y una interpretación de la información. En la segunda etapa se realizó un análisis del riesgo y vulnerabilidad mediante un instrumento de recolección de información, que posteriormente se analizó de forma estadística y se interpretó con respecto a planes de manejo del riesgo. Finalmente, en una tercera etapa, se realizó un muestreo de la calidad del agua suministrada por las ASADAS a las comunidades en tres puntos: en las fuentes, la red y los tanques de almacenamiento (Araya et al., 2010).

El autor planteó claramente los resultados y discusión en diferentes áreas del conocimiento: la ambiental, social y administrativa; de igual manera se realizaron los análisis de agua, riesgo y vulnerabilidad. Dentro de los resultados más relevantes se encuentra que en el país resulta evidente el crecimiento y desarrollo comunal y con él, la creciente demanda de servicios (Araya et al., 2010). Uno de los servicios con más demanda es el agua para el consumo humano, que conlleva un impacto ambiental, ya sea por la explotación normal o sobreexplotación del recurso hídrico, específicamente por la explotación de nacimientos de agua, por los pozos perforados, las aguas subterráneas, entre otros aspectos (Araya et al., 2010). Por lo tanto, es importante analizar este impacto, cuyos resultados se dan a conocer después de analizar la información recabada en las diferentes comunidades por medio de las juntas directivas administradoras de los acueductos rurales (ASADAS). Otro aspecto analizado dentro de la entrevista fueron las acciones para minimizar el impacto ambiental, producto de la actividad generada por el suministro de agua para el consumo humano y otras actividades propias de una comunidad, tales como el comercio, la agricultura y actividades industriales (Araya et al, 2010).

El artículo de Araya et al., (2010) concluye con que los acueductos rurales son administrados por juntas directivas con poca formación sobre el manejo de recurso hídrico y su administración; de igual manera a pesar de que la inversión que hacen las ASADAS es fuerte (desde el punto de vista porcentual), la mayoría de ellas sigue teniendo problemas con la red. Dichos problemas podrían deberse a la creciente necesidad de la población por el servicio de agua, lo cual hace que las ASADAS tengan que invertir más en el crecimiento de la red que en su mantenimiento. Por último, la mayoría de los acueductos no cuenta con un programa de gestión ambiental.

## ***Artículo 2. “Vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales: cómo identificarla - Instituto Tecnológico de Costa Rica”***

Este documento pretende realizar un análisis el cual tuvo como objetivo determinar la vulnerabilidad de los nacimientos y las respectivas zonas de amortiguamiento de 24 sistemas de acueductos rurales de la zona Huetar Norte, específicamente en San Carlos, Costa Rica (Navarro, Araya, Pérez, Moreira y Estrada, 2013). La metodología empleada se trabajó con una muestra estadística de organizaciones que suministran el agua de consumo a las comunidades. Estos sistemas son desarrollados y operados por las Asociaciones Administradoras de Acueductos Rurales (ASADAS) (Navarro et al., 2013). También la propuesta evaluó cualitativamente los componentes de varios sistemas de acueductos rurales, los cuales están conformados por los nacimientos, tanques de almacenamiento y la red de distribución. Para determinar la evaluación de vulnerabilidad se realizó una encuesta entre los miembros de las ASADAS y se tomó en cuenta el estado de la infraestructura de los acueductos. También se realizaron muestreos de agua para determinar las variables de tipo fisicoquímico y biológico (Navarro et al., 2013).

El análisis en este proyecto contempló las variables que representan vulnerabilidades para el sistema; entre las variables creadas por el ser humano se encuentran las relacionadas con el crecimiento agrícola, ganadero y urbano, que afectan de forma directa o indirecta los sistemas e incluso son una amenaza para su buen funcionamiento y permanencia en el tiempo. Otras variables analizadas son las generadas por la misma naturaleza, tal es el caso de sismos, terremotos, vulcanismo, inundaciones y deslizamientos. Otro de los aspectos analizados fue la educación y la gestión ambiental dentro de las mismas ASADAS (Navarro et al., 2013). Es por esto que Navarro et al., (2013) plantea como conclusión que el análisis permitió determinar cualitativamente la vulnerabilidad que representan los fenómenos creados por el ser humano y la naturaleza para los sistemas de acueductos rurales; además, se determinó la ausencia de programas educativos y de gestión ambiental por parte de las ASADAS.

## ***Artículo 3. “Uso de las plantas de tratamiento de agua potable en acueductos rurales”***

Liliana María Varón en el 2014, realizó esta tesis de magister en la que a grandes rasgos analiza las limitaciones que encuentra en Colombia, atendiendo a sus compromisos para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En particular a lo concerniente al aseguramiento de la cobertura de agua potable, el país ha hecho esfuerzos en algunas regiones por mejorar la infraestructura relacionada. Sin embargo, en muchas ocasiones esta infraestructura es abandonada y no usada por las comunidades beneficiarias.

El trabajo tuvo como objetivo identificar los factores que determinan las decisiones de uso de las plantas de tratamiento de agua potable en los acueductos rurales, tomando un caso de estudio como referencia (acueductos rurales



pertenecientes al municipio de El Retiro (Antioquia). Para tal fin, se realizaron grupos focales con los actores involucrados en la operación, administración, monitoreo y control de los acueductos rurales que permitieran identificar factores claves en las decisiones de uso de la infraestructura.

Posteriormente se realizó una encuesta a los usuarios de estos acueductos. A través de un modelo de regresión logística binaria y aplicando el método stepwise forward-backward con el cual se alimentó el software R versión 3.0.2, como resultado a las encuestas que se realizaron por medio del software la autora encontró que las características económicas e institucionales son las más determinantes para que una comunidad use o no las plantas de tratamiento de agua potable en los acueductos rurales de igual manera encontró que los factores que mas inciden en que una comunidad rural tenga una planta de tratamiento son el económico y el tecnológico.

Como conclusiones del documento se obtienen que al encontrar el factor económico como el más determinante para que una comunidad haga uso de la planta de tratamiento con la garantía de no ocasionar riesgo para la salud, lleva a considerar la importancia de estimular, en los usuarios de los acueductos rurales, la cultura del pago puntual de las facturas así como la implementación de medidas eficaces para los usuarios que no pagan el servicio, por otro lado a pesar de que el factor ambiental no es el más determinante para que una comunidad use la planta de tratamiento, si es importante para que se suministre agua sin riesgo para la salud, razón por la cual la comunidad debe apropiarse de la fuente de nacimiento de agua del acueducto, con programas de conservación y limpieza.

### **7.1.2. Marco Teórico**

A nivel América más específicamente en el caso de Perú, para el Ingeniero Adolfo Toledo “la gestión del agua equivale a la gestión de conflictos” siendo para el país fundamental que las agencias nacionales e internacionales adquieran compromiso y le den la importancia a la gestión integrada del recurso hídrico.

Por tanto, para Toledo (s.f.) la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) significa que todos los diferentes usos de los recursos hídricos se consideran en forma conjunta. También significa asegurar la creación de políticas coherentes en relación con todos los sectores. Como se verá, el concepto básico de GIRH fue ampliado para incorporar la toma de decisiones participativa y se utiliza en su sentido más amplio. Enfatiza no sólo centrarse en desarrollar recursos hídricos sino administrar en forma eficiente el desarrollo hídrico para garantizar el uso sostenible a largo plazo para las generaciones futuras.

En Colombia es fundamental hablar de la gestión integral del recurso hídrico para llevar a cabo proyectos de inversión en el sector agua potable y saneamiento básico ya que es la principal figura en cuanto a la legislación colombiana ya sea en

ordenamiento territorial como el Plan de Ordenamiento y Manejo de cuencas (POMCA) o para el uso y/o aprovechamiento como lo es, la política de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Por esto para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2018), la GIRH busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas.

Así mismo la GIRH se define como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (MADS, 2018). Por lo anterior el uso y aprovechamiento planteado en el POMCA como gobernabilidad del agua, lleva a pensar que varios sectores como el de agua potable y saneamiento básico están profundamente ligados a plantear proyectos para dar cumplimiento a la legislación y programas de asistencia técnica dirigidos a las autoridades ambientales que permitan la transferencia de los protocolos, guías y herramientas que sean diseñados para la adecuada gestión del recurso hídrico.

Dentro de estos proyectos se incluyen aquellos con fines de inversión para acueductos y alcantarillado; dentro de los primeros, se pueden clasificar los que son para espacios urbanos y rurales; para los rurales se describen como acueductos comunitarios, (Salazar, 2011) es simplemente una comunidad que presta el servicio público de agua que se crea como una organización sin ánimo de lucro, solicita a la autoridad ambiental la concesión sobre una fuente de agua e implementa un sistema de redes de conducción del líquido, hasta las viviendas de los vecinos del sector, dando cumplimiento a todas las normas que se expidan para regular esta actividad.

Muy diferente a la apreciación de Cadavid (2009) en donde primeramente los acueductos comunitarios nacen en algunas zonas periurbanas ya que el servicio de acueducto se presta a través de redes descentralizadas que utilizan aguas procedentes de microcuencas cercanas y que muchas veces son administradas directamente por las comunidades, estos acueductos fomentan el desarrollo local sostenible, de igual manera generan valores de conservación y apropiación con el territorio. Una de las ventajas de estos acueductos según Villada (2012), es la generación entre las comunidades de fortalecimiento del tejido social, formación de alianzas y estrategias que les ha permitido a través de la historia un reconocimiento y confianza en la labor y servicio que prestan a su comunidad, puesto que la estructura que define a los prestadores de servicio de agua está ligada a la solidaridad, confianza y participación.

Por lo tanto, se puede decir que es fundamental el trabajo social y la creación de las características mencionadas anteriormente para la conformación de un acueducto comunitario sin dejar de lado el objetivo de brindar el servicio de agua a su comunidad. Sin embargo, a pesar de ser gestionadas internamente por las mismas comunidades deben cumplir con un óptimo funcionamiento cumpliendo con cada uno de los equipos o las obras ingenieriles para garantizar la calidad y cantidad del servicio a prestar.

Hablando específicamente de las plantas de tratamiento de agua potable, existen de muchos tipos y con diferentes maneras de funcionar pero para Burchard (2005), no depende de los tipos de plantas sino del propósito que tienen en común, por ejemplo, para el mismo autor, el propósito es “el eliminar los microorganismos, sustancias químicas, caracteres físicos y radiológicos que sean nocivos para la salud humana”, así como dice Burchard, el tratamiento del agua va netamente encaminado a contribuir a la salud humana por esto según la OMS y Fondo Internacional de Emergencia de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) en el año 2014, las enfermedades diarreicas son la segunda mayor causa de muerte de niños menores de cinco años, matando a 760.000 niños cada año, pudiéndose prevenir mediante el acceso al agua potable y a servicios adecuados de saneamiento e higiene, por esto el tratamiento y el uso que se le da al agua es sumamente importante para preservar en un futuro la vida de todos.

## **7.2. Marco Conceptual**

Dentro de la problemática del “saneamiento básico” de comunidades, tienen enorme importancia el suministro de agua potable y recolección de las aguas residuales. Cualquier población, por pequeña que sea, debería contar como mínimo con los servicios de acueducto y alcantarillado. El trabajo que deben realizar los ingenieros hoy en día no es tanto el diseño y ampliación de las redes en grandes ciudades, sino la creación de la infraestructura necesaria en poblaciones pequeñas, con miras a lograr soluciones adecuadas y acordes con una limitada inversión capital (López, 2003).

Si se pretende suministrar agua potable a una comunidad, se requiere llevar a cabo una serie de obras hidráulicas para la captación, el sistema de purificación del agua, la conducción, el almacenamiento y la distribución (López, 2003).

### **7.2.1. Partes de un acueducto**

#### **7.2.1.1. Fuente de abastecimiento**

La fuente de abastecimiento de agua puede ser superficial, como en los casos de los ríos, lagos, embalses e incluso aguas lluvias, o de aguas subterráneas superficiales o profundas. La elección del tipo de abastecimiento depende de factores tales como calidad y cantidad (López, 2003).

#### **7.2.1.2. Captación**

La clase de estructura utilizada para la captación del agua depende del tipo de fuente de abastecimiento utilizado. En general, en los casos de captación de aguas superficiales se habla de bocatomas, mientras que la captación de aguas subterráneas se hace por medio de pozos (López, 2003).

### **7.2.1.3. Bocatomas**

El término general utilizado para las obras de captación, derivación o toma en ríos, es bocatoma, por medio de esta estructura se puede derivar el caudal de diseño que usualmente corresponde al caudal máximo diario. Existen diversos tipos de bocatomas, los factores determinantes para su selección es la naturaleza del cauce y la topografía general del proyecto (López, 2003).

- **Toma lateral con muro transversal**

Se utiliza en ríos de bajo caudal o quebradas, en donde la profundidad del cauce no es muy grande. Un muro transversal a manera de presa eleva la lámina de agua y esta es captada lateralmente a través de una rejilla colocada en uno de los muros (López, 2003).

- **Bocatoma de fondo**

El agua se capta a través de una rejilla colocada en la parte superior de la presa, que a su vez se dirige en sentido normal de la corriente. El ancho de la presa puede ser igual o menor que el ancho del río (López, 2003).

- **Bocatoma lateral por gravedad**

Si se dispone de las condiciones hidráulicas y topográficas suficientes la captación en ríos profundos puede hacerse por gravedad, de manera similar a la toma con muro transversal, reemplazando el muro por compuertas y la rejilla por otra de mayor dimensión. En este caso se puede hacer el tratamiento primario de desarenador en forma inmediata. (López, 2003).

- **Toma mediante estabilización del lecho**

Cuando el ancho del río es muy grande y el lecho no es muy estable, se hace una canalización; la toma puede ser lateral o de fondo (López, 2003).

### **7.2.1.4. Desarenador**

Un desarenador convencional es un tanque construido con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad. Este elemento constituye un tratamiento primario, pero en algunos casos es necesario realizar el tratamiento convencional de purificación de aguas. El desarenador debe situarse lo más cerca posible de la bocatoma con el fin de evitar problemas de obstrucción en la línea de aducción (López, 2003).

#### **7.2.1.5. Conducción**

En un proyecto de acueductos, existen diferentes necesidades de transporte de agua. En principio, las condiciones de diseño para el transporte de agua deben ser las de transportar agua cruda (sin tratamiento), evento en el que se usa el término conducción (López, 2003).

Dependiendo de las condiciones topográficas y la distancia, el transporte del agua puede efectuarse en tuberías o conductos a presión o por gravedad. La aducción, por tratarse del transporte de agua cruda, puede realizarse en conductos abiertos o cerrados, pero las conducciones deben hacerse en conductos cerrados, normalmente tuberías que trabajan a una presión mayor que la atmosférica (López, 2003).

#### **7.2.1.6. Tratamiento del agua**

En la actualidad, ningún agua en su estado natural es apta para el consumo humano; además, siempre se requerirá un tratamiento mínimo de cloración, con el fin de prevenir la contaminación con organismos patógenos durante la conducción del agua (López, 2003).

#### **7.2.1.7. Sedimentación**

Es la separación de partículas sólidas suspendidas en una corriente de líquido mediante su asentamiento por gravedad. El proceso de sedimentación tiene dos objetivos: la clarificación y el espesamiento. La finalidad primordial es remover las partículas finas suspendidas y producir un efluente claro, mientras que la del espesamiento es incrementar la concentración de sólidos suspendidos en una corriente de alimentación. (Comisión Nacional del Agua -CONAGUA, s.f).

#### **7.2.1.8. Filtración**

Es un proceso de tratamiento destinado a remover materia sólida en suspensión mediante su paso por un medio granular o poroso. La filtración generalmente sigue a los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Permite además una buena eliminación de bacterias, color, turbiedad, así como ciertos problemas de olor y sabor en el agua (CONAGUA, s.f).

#### **7.2.1.9. Ablandamiento**

El objetivo tecnológico del ablandamiento es la remoción de iones de calcio y magnesio, principales causantes de la dureza en el agua. Otros iones como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  también desencadenan dureza en el agua (CONAGUA, s.f).

#### **7.2.1.10. Cloración**

Aunque no se requiera la construcción de una planta de purificación de aguas convencional, el tratamiento mínimo que debe dársele al agua es la desinfección, con el fin de entregarla libre de organismos patógenos (causantes de enfermedades en el organismo humano). Además, se debe prever una protección adicional contra la contaminación eventual en la red de distribución (López, 2003).

#### **7.2.1.11. Tanque de almacenamiento**

Dado que el caudal de captación no es siempre constante, así como el demandado por la comunidad tampoco lo es, se requiere almacenar agua en el tanque durante los periodos en los que la demanda es menor que el suministro y utilizarla en los periodos en la que la comunidad necesite gran cantidad de líquido (López, 2003).

#### **7.2.1.12. Distribución**

La distribución del agua a la comunidad puede hacerse de manera más simple, que sería un suministro único por medio de una pileta de agua, hasta su forma más compleja, por medio de una serie tuberías o redes de distribución que llevan el agua a cada dominio (López, 2003).

### **7.2.2. Tipos de plantas de potabilización**

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta. También se pueden clasificar de acuerdo con la tecnología usada en el proyecto, en plantas convencionales antiguas, plantas de tecnología importada o de patente (Vargas, 2004).

#### **7.2.2.1. Plantas de filtración rápida**

Estas plantas se denominan así porque los filtros que las integran operan con velocidades altas, entre 80 y 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d, de acuerdo con las características del agua, del medio filtrante y de los recursos disponibles para operar y mantener estas instalaciones. Como consecuencia de las altas velocidades con las que operan estos filtros, se colmatan en un lapso de 40 a 50 horas en promedio (Vargas, 2004). En esta situación, se aplica el retro lavado o lavado ascensional de la unidad durante un lapso de 5 a 15 minutos (dependiendo del tipo de sistema de lavado) para descolmar el medio filtrante devolviéndole su porosidad inicial y reanudar la operación de la unidad. De acuerdo con la calidad del agua por tratar, se presentan dos soluciones dentro de este tipo de plantas: plantas de filtración rápida completa y plantas de filtración directa (Vargas, 2004).

#### **7.2.2.2. Planta de filtración rápida completa**

Una planta de filtración rápida completa normalmente está integrada por los procesos de coagulación, decantación o sedimentación, filtración y desinfección (Vargas, 2004).

#### **7.2.2.3. Filtración directa**

Es una alternativa a la filtración rápida, constituida por los procesos de mezcla rápida y filtración, apropiada sólo para aguas claras. Son ideales para este tipo de solución las aguas provenientes de embalses o represas, que operan como grandes pre-sedimentadores y proporcionan aguas constantemente claras y poco contaminadas (Vargas, 2004).

#### **7.2.2.4. Plantas de filtración lenta**

Los filtros lentos operan con tasas que normalmente varían entre 0,10 y 0,30 m/h; esto es, con tasas como 100 veces menores que las tasas promedio empleadas en los filtros rápidos; de allí el nombre que tienen. También se les conoce como filtros ingleses, por su lugar de origen. Los filtros lentos simulan los procesos de tratamiento que se efectúan en la naturaleza en forma espontánea, al percolar el agua proveniente de las lluvias, ríos, lagunas, etcétera, a través de los estratos de la corteza terrestre, atravesando capas de grava, arena y arcilla hasta alcanzar los acuíferos o ríos subterráneos (Vargas, 2004).

Al igual que en la naturaleza, los procesos que emplean estos filtros son físicos y biológicos. Una planta de filtración lenta puede estar constituida sólo por filtros lentos, pero dependiendo de la calidad del agua, puede comprender los procesos de desarenado, pre-sedimentación, sedimentación, filtración gruesa o filtración en grava y filtración lenta (Vargas, 2004).

### **7.2.3. Calidad del agua**

La calidad del agua de la fuente debe caracterizarse de la manera más completa posible para poder identificar el tipo de tratamiento que necesita y los parámetros principales de interés en periodo seco y de lluvia, especialmente cuando se trata de aguas superficiales. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2017).

El agua para consumo humano no debe contener microorganismos patógenos, ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Por tanto, debe cumplir los requisitos de calidad microbiológicos y fisicoquímicos exigidos en el Decreto 475 de marzo 10 de 1998, expedido por el Ministerio de Salud o en su defecto, el que lo reemplace. La calidad del agua no debe deteriorarse ni caer por debajo de los límites establecidos durante el periodo de tiempo para el cual se diseñó el sistema de abastecimiento (UNICEF, 2007).

### 7.2.3.1. Análisis físicos y químicos del agua

Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o ambas, según la Resolución 2115 de 2007 (MADS, 2007).

- **Características físicas**

El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

*Tabla 1. Características físicas del agua*

| Características físicas | Expresadas como                            | Valor máximo aceptable |
|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| Color aparente          | Unidades de Platino Cobalto (UPC)          | 15                     |
| Olor y Sabor            | Aceptable o no aceptable                   | Aceptable              |
| Turbiedad               | Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT) | 2                      |

*Fuente:* (MADS, 2007)

- **Características químicas que tienen reconocido efecto en la salud humana**

Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse en los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:

*Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana*

| Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias | Expresados como | Valor máximo aceptable (mg/L) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Antimonio                                                                                                       | Sb              | 0,02                          |
| Arsénico                                                                                                        | As              | 0,01                          |
| Bario                                                                                                           | Ba              | 0,7                           |
| Cadmio                                                                                                          | Cd              | 0,003                         |
| Cianuro libre y disociable                                                                                      | CN <sup>+</sup> | 0,05                          |
| Cobre                                                                                                           | Cu              | 1,0                           |
| Cromo total                                                                                                     | Cr              | 0,05                          |
| Mercurio                                                                                                        | Hg              | 0,001                         |
| Níquel                                                                                                          | Ni              | 0,02                          |
| Plomo                                                                                                           | Pb              | 0,01                          |
| Selenio                                                                                                         | Se              | 0,01                          |
| Trihalometanos totales                                                                                          | THMs            | 0,2                           |



|                                             |     |      |
|---------------------------------------------|-----|------|
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) | HAP | 0,01 |
|---------------------------------------------|-----|------|

*Fuente:* (MADS, 2007)

Si los compuestos de trihalometanos totales o los de hidrocarburos policíclicos aromáticos señalados en la tabla 2, exceden los valores máximos aceptables, es necesario identificarlos y evaluarlos, de acuerdo con el mapa de riesgo y a lo señalado por la autoridad sanitaria (MADS, 2007).

- **Características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana**

Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en la siguiente tabla:

***Tabla 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana***

| Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana | Expresados como              | Valor máximo aceptable (mg/L) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Carbono orgánico total                                                                                         | COT                          | 5,0                           |
| Nitritos                                                                                                       | NO <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,1                           |
| Nitratos                                                                                                       | NO <sub>3</sub> <sup>+</sup> | 10                            |
| Fluoruros                                                                                                      | F <sup>-</sup>               | 1,0                           |

*Fuente:* (MADS, 2007)

Cualquier incremento en las concentraciones habituales de Carbono Orgánico Total (COT) debe ser investigado conjuntamente por la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano y la autoridad sanitaria, con el fin de establecer el tratamiento correspondiente para su reducción (MADS, 2007).

- **Características químicas que tienen consecuencias económicas y directas sobre la salud humana**

Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud se señalan a continuación:

**Tabla 4. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud**

| Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico | Expresados como               | Valor máximo aceptable (mg/L) |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Calcio                                                                     | Ca                            | 60                            |
| Alcalinidad total                                                          | CaCO <sub>3</sub>             | 200                           |
| Cloruros                                                                   | Cl <sup>-</sup>               | 250                           |
| Aluminio                                                                   | Al <sup>3+</sup>              | 0,2                           |
| Dureza total                                                               | CaCO <sub>3</sub>             | 300                           |
| Hierro total                                                               | Fe                            | 0,3                           |
| Magnesio                                                                   | Mg                            | 36                            |
| Manganeso                                                                  | Mn                            | 0,1                           |
| Molibdeno                                                                  | Mo                            | 0,07                          |
| Sulfatos                                                                   | SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> | 250                           |
| Zinc                                                                       | Zn                            | 3                             |
| Fosfatos                                                                   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | 0,5                           |

Fuente: (MADS, 2007)

#### 7.2.3.2. Análisis microbiológico

Son los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos (MADS, 2007).

##### • Técnicas para realizar análisis microbiológico

Las técnicas aceptadas para realizar los análisis microbiológicos del agua para consumo humano son las siguientes:

- **Para *Escherichia coli* y coliformes totales:** Filtración por membrana, sustrato definido, enzima sustrato y presencia-ausencia. Se podrán adoptar otras técnicas y metodologías debidamente validadas por el Instituto Nacional de Salud (INS) o éste realizará una validación con base en documentos soporte de organismos internacionales que presenten los solicitantes (MADS, 2007).

- **Para *Giardia* y *Cryptosporidium*:** Las técnicas y metodologías de análisis para estos microorganismos deben ser validadas por el INS o revalidadas por éste con base en documentos soporte de organismos internacionales que presenten los solicitantes (MADS, 2007).

##### • Características microbiológicas

Las características microbiológicas del agua para consumo humano deben enmarcarse dentro de los siguientes valores máximos aceptables, los cuales son establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) ó 1 microorganismo en 100 cm<sup>3</sup> de muestra:

**Tabla 5. Características microbiológicas del agua**

| <b>Técnicas utilizadas</b> | <b>Coliformes Totales</b>                    | <b><i>Escherichia coli</i></b>               |
|----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Filtración por membrana    | 0 UFC/100 cm <sup>3</sup>                    | 0 UFC/100 cm <sup>3</sup>                    |
| Enzima Sustrato            | < de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup> | < de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup> |
| Sustrato Definido          | 0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>      | 0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>      |
| Presencia - Ausencia       | Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>              | Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>              |

*Fuente:* (MADS, 2007)

Como prueba complementaria se recomienda realizar la determinación de microorganismos mesofílicos, cuyo valor máximo aceptable será de 100 UFC en 100 cm<sup>3</sup>. Ninguna muestra de agua para consumo humano debe contener *E.coli* en 100 cm<sup>3</sup> de agua, independientemente del método de análisis utilizado. El valor aceptable para *Giardia* es de cero (0) Quistes y para *Cryptosporidium* debe ser de cero (0) Ooquistes por volumen fijado según la metodología aplicada (MADS, 2007).

### 7.3. Marco Geográfico

El municipio de Viotá se encuentra ubicado en el Departamento de Cundinamarca, que se localiza en la región Centro Oriente de Colombia, el cual tiene límites en el norte con Boyacá, en el occidente con el río Magdalena, en sur con los departamentos Meta, Tolima y Huila, y al oriente con el Casanare. Ubicándose en la Cordillera Oriental, se encuentra en las coordenadas 4° 36'00'' de latitud norte y 74° 05' 00'' de longitud oeste, Cundinamarca está subdividido 116 municipios teniendo a Bogotá D.C. como su capital departamental (Alcaldía de Viotá, 2016-2019).

Conforme con la distribución del Departamento de Cundinamarca, el Municipio de Viotá se encuentra en la Provincia del Tequendama, la cual está conformada por diez (10) municipios y tiene por capital La Mesa (Cundinamarca). Viotá es la tercera población más grande de la Provincia, después de La Mesa y El Colegio. Sin embargo, es preciso observar en el histórico de número de la población desde 2000 a 2015, que el municipio viene decreciendo en número, perdiendo participación dentro de la Provincia (Alcaldía de Viotá, 2016-2019).

El municipio de Viotá se encuentra a 86 Km de Bogotá, en la parte sur de la Provincia del Tequendama y colinda al norte con los municipios El Colegio, Anapoima y Apulo, al occidente con Tocaima; al sur con Nilo y Tocaima, al Oriente con Silvania, Tibacuy y Granada. Sus coordenadas geográficas 4° 27'00'' latitud norte y 74° 32'00'' longitud oeste. Conforme con la información que ofrece la Gobernación de Cundinamarca, de los 22.478 km<sup>2</sup> del Departamento de Cundinamarca, 208 corresponden al municipio de Viotá, es decir 0,9% el área departamental. Es un municipio principalmente rural. Aproximadamente el 99,3% del área municipal es rural y en relación con su población, en Viotá se encuentra una distribución en la que el 67,5% también lo es rural (Alcaldía de Viotá, 2016-2019).

### *Ilustración 1. Ubicación del Municipio de Viotá*



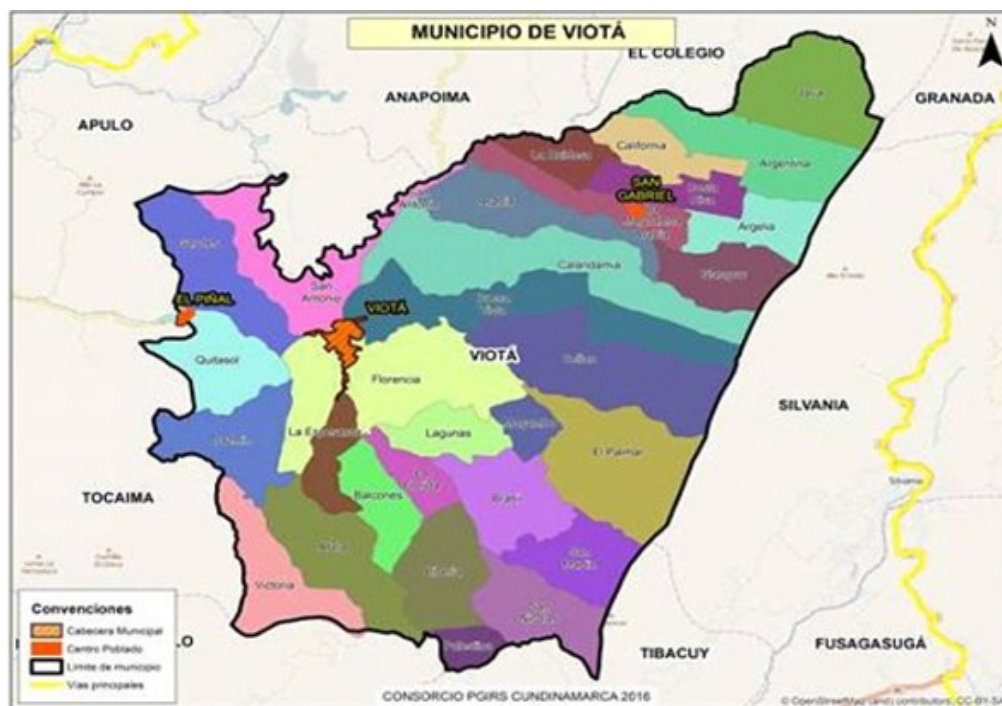
*Fuente:* (Empresa de Servicios Públicos de Cundinamarca, 2017)

#### **7.3.1. División político-administrativa**

Conforme con Diagnóstico para el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), el municipio de Viotá se distribuye de la siguiente manera:

- EL PIÑAL: El Espino, Quitasol y Jazmín.
- EN LIBERIA: Alto Palmar, Bajo Palmar, Mogambo, Lagunas, Puerto Brasil, Florida, San Nicolás, San Martín, El Retiro, El Reposo, Palestina, Laguna Larga, La Victoria Alta, La Victoria Baja, Florencia.
- EN SAN GABRIEL: Java, Santa Teresa, Alto Argentina, Bajo Argentina, Costa Rica, Argelia, Glasgow, La Dulce, California, Modelia, Arabia, Magdalena Alto, Magdalena Bajo, La Ruidosa, Calandaima Alto, Calandaima Centro, Calandaima Bajo, Las Margaritas, El Retén, El Roblal.
- EN EL CASCO URBANO: Buenavista, Neptuna, Carolina, Capotes, Guasimal, Salitre, San Antonio, Riolindo, América, La Bella, Alto Ceylán, Bajo Ceylán, La Esperanza, Las Palmas, La Unión, Pueblo Piedra (Alcaldía de Viotá, 2016-2019).

**Ilustración 2. División político-administrativa de Viotá**



*Fuente:* (Empresa de Servicios Públicos de Cundinamarca, 2017)

### 7.3.2. Climatología

La región de Viotá está ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, donde el clima y el relieve son muy variados, con registros de temperatura que oscilan entre 6 ° y 30 °C y precipitaciones entre 900 y 1900 mm, anual. Las condiciones climáticas del municipio de Viotá se mantienen respecto a las detalladas en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) aprobado en el 2010.

**Tabla 6. Climatología del municipio de Viotá**

| Característica                 | Unidad | Mínima | Máxima | Promedio |
|--------------------------------|--------|--------|--------|----------|
| Temperatura ambiente           | ° C    | 18     | 24     | 21       |
| Precipitación (promedio/mes)   | mm/Mes | 125    | 166,7  | 145,8    |
| Evaporación (promedio/mes)     | mm/Mes | 75     | 92     | 83       |
| Horas de brillo solar          | h/día  | 4      | 5      | 4,5      |
| Humedad ambiente               | %      | 75     | 80     | 77,5     |
| Velocidad del viento           | m/s    | 1      | 2      | 1,5      |
| Evapotranspiración media anual | mm     | 125    | 166,7  | 145,8    |

*Fuente:* (ESPV, 2014)

La humedad relativa, está entendida como la cantidad de agua en forma de vapor presente en la atmósfera. La variable tiene un carácter climatológico de primera magnitud por relacionarse con mecanismos como nubosidad, precipitación visibilidad y en especial con la temperatura ya que depende de ella. El Municipio presenta un porcentaje promedio de humedad relativa anual entre 75,1 - 80%, (Empresa de Servicios Públicos de Viotá - ESPV, 2014).

### **7.3.3. Pisos Térmicos**

El Municipio de Viotá debido a su posición geográfica se clasifica en el piso cálido y seco, zona de bosque seco tropical, con temperaturas medias superiores a los 24 °C y precipitación anual de 1000 mm. Las condiciones en este aspecto no se han modificado con respecto al Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) aprobado en el municipio en el 2010 (ESPV, 2014).

### **7.3.4. Hidrología**

Viotá cuenta con dos cuencas hidrográficas, a saber: la cuenca del Río Calandaima y la Cuenca Occidental (no tributaria del Río Calandaima):

La Cuenca del Río Calandaima: Está comprendido por cuatro subcuencas, 27 microcuencas directas y 97 afluentes (38 de estas drenan a las microcuencas directas), la vertiente central o del Río Lindo cuenta con cinco subcuencas, 30 microcuencas (19 de estas son directas) y 71 afluentes (10 de estas drenan a las microcuencas directas) y la vertiente sur o de la Quebrada La Pilama, que comprende una subcuenca, con tres microcuencas y 15 afluentes (ESPV, 2014).

La Cuenca Occidental (no tributaria del Calandaima): cuenta con dos vertientes, La Quebrada La Hoya o Vertiente Noroccidental comprende una subcuenca, una microcuenca y veinticuatro afluentes, la Vertiente Suroccidental o de La Quebrada la Neivana cuenta con una subcuenca, seis microcuencas y 42 afluentes. La cuenca del río Bogotá, tiene un área de drenaje de 5,907 km<sup>2</sup>, riega el Departamento de Cundinamarca en sentido Noreste – Sureste, desde su nacimiento en el Municipio de Villapinzón a 3.300 m.s.n.m., hasta su desembocadura en el río Magdalena (municipio de Girardot) a una altura 600 m.s.n.m. A lo largo de los 310 km de recorrido, el río baña 41 municipios con una población aproximada de 8,3 millones de habitantes, de los cuales 7 millones se localizan en el Distrito Capital (ESPV, 2014).

### **7.3.5. Geología**

El municipio se encuentra sobre las unidades estructurales de la formación coluvión (Qc) Capulca, suelos formados a partir de limos y arcillas en mayor cantidad; gravas, guijos, arenas, cuarzo, lodolitas calcáreas, arcillolitas lodosas no calcáreas, capas de caliza y concreciones micríticas (Atlas de Cundinamarca, págs. 56- 57, 2007). Las condiciones en este aspecto no se han modificado con respecto al PGIRS aprobado en el municipio en el 2010 (ESPV, 2014).

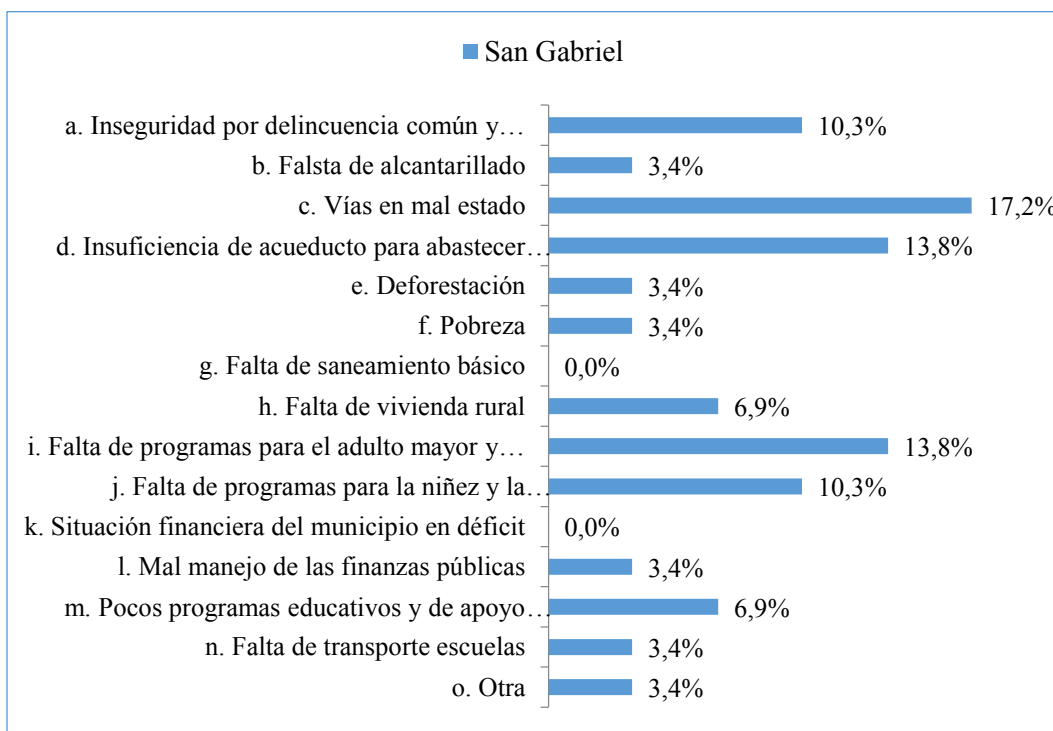
### 7.3.6. Geomorfología

No obstante, la configuración topográfica quebrada y el predominio del relieve ondulado de los suelos se encuentran bien drenados. El material parental lo constituye una matriz arcillosa con inclusiones de lutitas y arenillas medianamente meteorizadas y cantos rodados. Las condiciones en este aspecto no se han modificado con respecto al PGIRS aprobado en el municipio en el 2010 (ESPV, 2014).

### 7.3.7. Salud

En el municipio de Viotá según el Plan de Desarrollo Municipal 2016-2020 en el sector San Gabriel correspondiente a la zona en donde se encuentra ubicada la vereda Magdalena, se considera “la insuficiencia del acueducto para abastecer de agua y de calidad de la misma ya que no se cuentan con plantas de tratamiento” como uno de los puntos más preocupantes para la población como se puede ver en la Ilustración 3, por esto se puede determinar que la población del sector siente una cercanía con la problemática y se hace notoria la importancia que tiene el tema de calidad del agua en la población.

***Ilustración 3. Resultados encuesta de satisfacción sector San Gabriel***

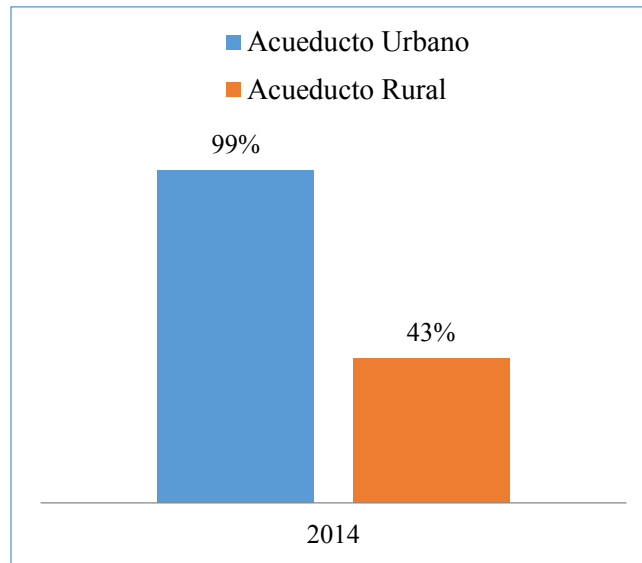


*Fuente:* Alcaldía de Viotá, 2012 – 2015



En relación con los servicios públicos en la zona rural solamente se encuentra el 43% de cobertura total en acueductos rurales como se puede ver en la Ilustración 4, de los cuales ninguno posee planta de tratamiento de agua potable según el señor Diego Peña director de planeación de la gobernación de Cundinamarca en Viotá.

***Ilustración 4. Cobertura Servicio de Acueducto***



*Fuente:* Alcaldía de Viotá, 2016 – 2019

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente y relacionándolo de manera directa con la salud de la población según el Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015, la primera causa de morbilidad por consulta externa en el año 2010, fue la parasitosis intestinal debido a la falta de agua potable ya que no es apta para el consumo, asociado también con malos hábitos higiénicos y alimenticios. En segundo y tercer lugar se encuentra la rinofaringitis aguda, Diarrea y Gastroenteritis Aguda, los grupos de edad más afectados son infantes y menores y adolescentes así mismo el adulto mayor considerado como población vulnerable ante cualquier eventualidad, de igual manera estas causas se encuentran asociadas a factores de riesgo ambiental, como el clima, la contaminación de las aguas, mal manejo de basuras, excretas y a los malos hábitos higiénicos. Esto se puede evidenciar en las siguientes tablas.

**Tabla 7. Morbilidad por consulta externa - Edad de 1 a 4 años**

| No.                | Causas                   | Total        | Tasa 1.000    | %          |
|--------------------|--------------------------|--------------|---------------|------------|
| 1                  | Rinofaringitis           | 271          | 8,97          | 5,03       |
| 2                  | Parasitosis intestinal   | 139          | 9,73          | 7,7        |
| 3                  | Caries dental            | 132          | 9,24          | 7,32       |
| 4                  | Dermatitis               | 80           | 5,60          | 4,43       |
| 5                  | Asma                     | 73           | 5,11          | 4,05       |
| 6                  | Infección vías urinarias | 45           | 3,15          | 2,49       |
| 7                  | Rinitis                  | 41           | 2,87          | 2,27       |
| 8                  | Otitis                   | 40           | 2,80          | 2,21       |
| 9                  | Desnutrición             | 35           | 2,45          | 1,94       |
| 10                 | Anemias                  | 34           | 2,38          | 1,88       |
| Resto de causas    |                          | 912          | 63,85         | 50,6       |
| <b>Total casos</b> |                          | <b>1.802</b> | <b>126,17</b> | <b>100</b> |

*Fuente:* Alcaldía de Viotá, 2012 – 2015

**Tabla 8. Morbilidad por consulta externa - Edad de 5 a 14 años**

| No.                | Causas                          | Total        | Tasa 1.000   | %          |
|--------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------------|
| 1                  | Caries dental                   | 386          | 22,02        | 10,63      |
| 2                  | Parasitosis intestinal          | 341          | 23,87        | 9,39       |
| 3                  | Rinofaringitis                  | 237          | 16,59        | 6,53       |
| 4                  | Rinitis alérgica                | 107          | 7,49         | 2,94       |
| 5                  | Cefalea                         | 107          | 7,49         | 2,94       |
| 6                  | Falta de desarrollo fisiológico | 83           | 5,81         | 2,28       |
| 7                  | Desnutrición                    | 65           | 4,55         | 1,70       |
| 8                  | Dolor abdominal                 | 53           | 3,71         | 1,46       |
| 9                  | Asma                            | 52           | 3,64         | 1,43       |
| 10                 | Infección vías urinarias        | 50           | 3,50         | 1,37       |
| Resto de causas    |                                 | 2147         | 150,3        | 59,17      |
| <b>Total casos</b> |                                 | <b>3.628</b> | <b>254,0</b> | <b>100</b> |

*Fuente:* Alcaldía de Viotá, 2012 – 2015

**Tabla 9. Morbilidad por consulta externa - Edad de 60 y más años**

| No.                | Causas                    | Total              | Tasa 1.000         | %                  |
|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1                  | Hipertensión              | 58                 | 42,49              | 0,15               |
| 2                  | Diarrea y Gastroenteritis | 32                 | 23,44              | 0,08               |
| 3                  | Enfermedad pulmonar       | 32                 | 23,44              | 0,08               |
| 4                  | Infección vías urinarias  | 30                 | 13,91              | 0,08               |
| 5                  | Bronconeumonía            | 19                 | 21,97              | 0,05               |
| 6                  | Celulitis                 | 15                 | 13,91              | 0,04               |
| 7                  | Insuficiencia cardíaca    | 10                 | 10,98              | 0,02               |
| 8                  | Anemia                    | 3                  | 10,32              | 0,00               |
| 9                  | Leishmaniasis             | 1                  | 0,73               | 0,00               |
| 10                 | Tuberculosis              | 1                  | 0,73               | 0,00               |
| Resto de causas    |                           | 389                | 284                |                    |
| <b>Total casos</b> |                           | <b>No registra</b> | <b>No registra</b> | <b>No registra</b> |

*Fuente:* Alcaldía de Viotá, 2012 – 2015

#### 7.4. Marco Normativo

La legislación en Colombia acerca de los recursos naturales y el ambiente parte del Decreto 2811 en el año 1974 desde ese año en adelante la normatividad expedida en materia ambiental ha sido lo suficientemente amplia para que hasta el día de hoy se logre realizar una revisión minuciosa de las leyes y decretos en este caso del sector agua potable y saneamiento básico para obtener normativamente alternativas de acción frente a problemáticas y frente a la ejecución de proyectos.

La normatividad con respecto al sector agua potable y saneamiento básico por fortuna es actualizada, por lo que se puede observar en la siguiente tabla que, independientemente de la cantidad de leyes y/o decretos son lo suficientemente completos.

**Tabla 10. Normatividad**

| Norma                | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| POMCA Río Bogotá     | Por el cual se rige el plan de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas del Río Bogotá.                                                                                                                                                                       |
| Decreto 2811 de 1974 | Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.                                                                                                                                                         |
| Ley 9 de 1979        | Por la cual se dictan Medidas Sanitarias.<br>Título 2: suministro de agua.                                                                                                                                                                                          |
| Ley 99 de 1993       | Por el cual se crea 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. |

| <b>Norma</b>                                     | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Resolución 2115 de 2007                          | Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos, y frecuencias del sistema de control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano. |
| Ley 1450 de 2011 Art. 250<br>Decreto 475 de 2015 | Evaluación y visualización de proyectos de agua y saneamiento. Por el cual se reglamenta el art. 250 de la Ley 1450 de 2011 y se dictan otras disposiciones.         |
| Resolución 0330 de 2017                          | Expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS.     |

*Fuente:* Autores (2018)

## **8. Metodología**

La metodología, se divide principalmente en dos partes, la primera es el diseño metodológico en el cual se desarrollan todos los elementos que involucran las teorías y los métodos nombrados en el marco teórico teniendo en cuenta el planteamiento y la o las maneras de solucionar el problema conformado por el enfoque, el alcance de la investigación y/o el método general de la investigación; por otro lado la segunda parte es la metodología de la investigación o plan de trabajo, que a su vez esta subdividida para su fácil desarrollo por cada objetivo específico, donde se detallan las actividades, técnicas e instrumentos que se llevaron a cabo en esta investigación.

### **8.1. Diseño Metodológico**

El diseño metodológico utilizado en el presente proyecto de grado tuvo un alcance descriptivo y correlacional ya que según Hernández, Fernández, Baptista (2014), una investigación con este alcance “Considera un fenómeno estudiado y sus componentes, mide conceptos, define variables” así mismo, “Explica la relación entre variables y cuantifican relaciones entre variables de igual manera se utiliza un método exclusivo de investigación y se diseñan ciertas herramientas para recabar información que solo se aplican en el medio en el que actúa el fenómeno de estudio; para la tabulación y análisis de la información obtenida, se utilizan métodos y técnicas estadísticos y matemáticos que ayudan a obtener conclusiones formales, científicamente comprobadas”.

Partiendo de lo anterior se establece de manera clara el enfoque, siendo este mixto por las características de la investigación descritas por Hernández, et al.; (2014), comprendiendo características tanto cuantitativas como lo son los cálculos de diseño y análisis de laboratorio, como cualitativas, ya que para el diagnóstico se realizó observación sistemática y directa.

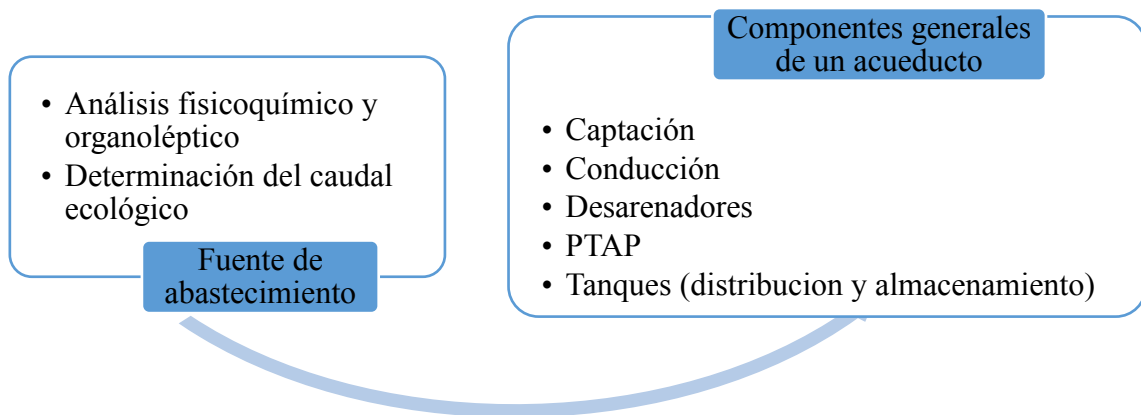
## 8.2. Metodología de la investigación

Para el desarrollo de la investigación, la metodología se dividió en dos grandes partes: “Evaluación preliminar” y “Desarrollo de alternativas”, éstas relacionadas con cada uno de los objetivos específicos. En la primera, se realizaron actividades correspondientes a la recopilación de información a partir de trabajo en campo así mismo su posterior análisis, para así poder realizar el diagnóstico del estado actual en que se encontraba el acueducto; en la segunda parte, a partir de los datos obtenidos y otros calculados en el objetivo específico uno, se proyectaron los datos de población, se estimaron los datos de dotación y se realizó el diseño de la matriz de evaluación de metodologías como herramienta para escoger la mejor alternativa de diseño para la optimización del acueducto y planta de tratamiento de agua potable, por último, en la tercera parte, se realizó el cálculo del presupuesto para determinar los costos de inversión y las posibles estimaciones de reducción de costos.

### 8.2.1. Evaluación preliminar

La metodología para el cumplimiento del objetivo específico número 1 se desarrolló de la siguiente manera: se realizó una evaluación preliminar en donde se incluyó una descripción general del estado actual del acueducto, dentro de esta fase se tomó el análisis de la fuente de abastecimiento entendiéndose como la evaluación de la calidad del agua que en ese momento estaba siendo captada y el diagnóstico de todos los componentes que en ese momento tenía el acueducto: constructivos, operativos y de mantenimiento.

#### *Ilustración 5. Evaluación preliminar*



*Fuente:* (Autores, 2018)

Los resultados del diagnóstico en campo se consignaron en una tabla, en donde se marcó una “X” en los parámetros que cumple y dejando en blanco los que no,

posteriormente fueron descritas en las observaciones las razones de la calificación ya sea positiva o negativa.

**Tabla 11. Diagnóstico**

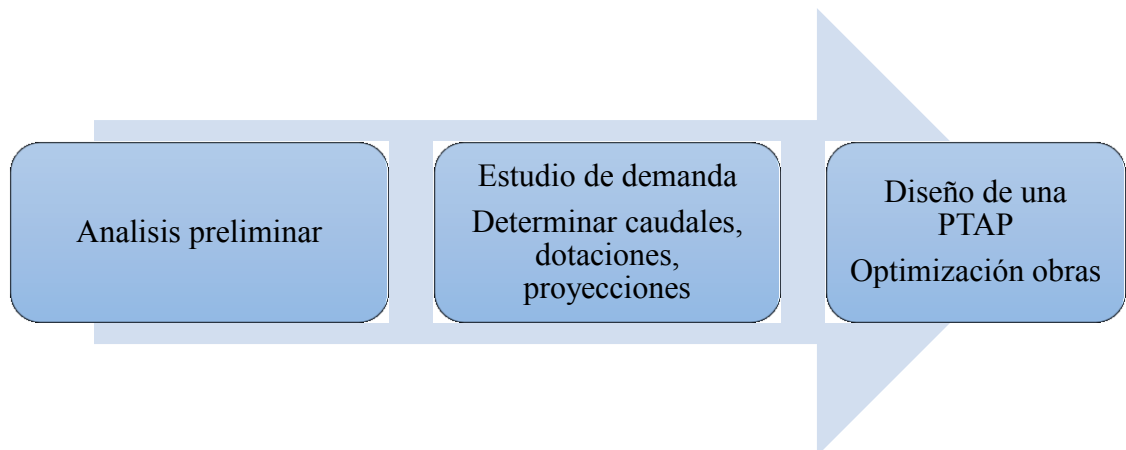
| Parte del acueducto | Diagnóstico  |           |               | Observaciones |
|---------------------|--------------|-----------|---------------|---------------|
|                     | Constructivo | Operativo | Mantenimiento |               |
| Bocatoma            |              |           |               |               |
| Aducción            |              |           |               |               |
| Conducción          |              |           |               |               |
| PTAP                |              |           |               |               |
| Tanques             |              |           |               |               |

*Fuente:* (Autores, 2018)

### 8.2.2. Desarrollo de alternativas

Para el cumplimiento del objetivo numero dos se realizó el estudio de la demanda (estimación de la población, periodo de diseño, obtención del consumo neto, consumo total, determinación caudal de diseño, determinación proyección de la demanda, determinación de proyección de población, entre otros); en segundo lugar se realizó la parte ingenieril (cálculo-optimización de las estructuras de captación, conducción, desarenadores y tanques); así mismo se realizó el diseño de la planta de tratamiento. Para escoger la mejor opción entre todos los tipos de planta de tratamiento se diseñó una matriz de evaluación de alternativas para identificar fácilmente la que más se adapte a las condiciones territoriales y a las necesidades de la población sin dejar de lado la óptima calidad.

**Ilustración 6. Desarrollo de alternativas**



*Fuente:* (Autores, 2018)

### ***Análisis de alternativas de sistemas de potabilización***

En esta matriz de doble entrada se evalúan principalmente componentes relacionados con la eficiencia del método para realizar la potabilización del agua y las facilidades de ejecución en cuanto a construcción, operación y mantenimiento. El puntaje total se realizó por medio de un promedio horizontal así obteniendo para cada uno de los sistemas de potabilización a partir de un rango de calificación entre 1 y 5.

***Tabla 12. Análisis de Alternativas de sistemas de potabilización***

| <b>Tipos</b>               | <b>Eficiencia</b> | <b>Construcción</b> | <b>Operación</b> | <b>Mantenimiento</b> | <b>TOTAL</b> |
|----------------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|--------------|
| Filtración rápida          |                   |                     |                  |                      |              |
| Filtración rápida completa |                   |                     |                  |                      |              |
| Filtración directa         |                   |                     |                  |                      |              |
| Filtración lenta           |                   |                     |                  |                      |              |

*Fuente:* (Autores, 2018)

Los parámetros de evaluación se realizaron con puntuaciones de 1 a 5, siendo 1 el más deficiente y 5 el más óptimo o con menor o mayor facilidad respectivamente. De igual manera para los resultados se realizó una jerarquización según los siguientes puntajes.

***Tabla 13. Parámetros de evaluación***

| <b>Parámetros de evaluación</b> | <b>Puntaje</b> |
|---------------------------------|----------------|
| Deficiente                      | 1-1,9          |
| Regular                         | 2-2,9          |
| Aceptable                       | 3-3,9          |
| Óptimo                          | 4-5            |

*Fuente:* (Autores, 2018)

#### ***8.2.2.1. Proyección de población***

Para la para la optimización del acueducto Regional Arabia en el municipio de Viotá, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros, dentro de los cuales se estableció el diseño y la localización con una proyección a 25 años. Para esto fue necesario realizar el cálculo de la tasa de crecimiento poblacional, empleando el Método Geométrico establecido en la Resolución 0330 Reglamento del sector agua potable y saneamiento básico (RAS) 2017, específicamente en el Título B del MVCT, 2017 con la siguiente ecuación:

### ***Ecuación 1. Método geométrico para la proyección suscriptor***

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

Dónde:

$r$  = Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

$P_f$  = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

$P_{uc}$  = Población correspondiente al último año proyectado.

$T_{uc}$  = Año correspondiente al último año proyectado.

$T_f$  = Año al cual se quiere proyectar la información.

La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

### ***Ecuación 2. Tasa de crecimiento anual***

$$r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc} - T_{ci})}} - 1$$

Dónde:

$r$  = Tasa de crecimiento anual en forma decimal.

$P_{uc}$  = Población correspondiente al último año proyectado.

$P_{ci}$  = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

$T_{uc}$  = Año correspondiente al último año proyectado.

$T_{ci}$  = Año correspondiente al censo inicial con información.

#### ***8.2.2.2. Cálculo de dotación neta***

La dotación neta debe determinarse haciendo uso de información de consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto, recopilada en el Sistema único de información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, siempre y cuando los datos sean consistentes. En todos los casos, se deberá utilizar un valor de dotación que no supere los datos establecidos en la siguiente tabla.



**Tabla 14. Dotación por suscriptor según la altura sobre el nivel del mar**

| <b>Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida</b> | <b>Dotación neta máxima (L/hab*día)</b> |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 2000 m.s.n.m                                                      | 120                                     |
| 1000 – 2000 m.s.n.m                                               | 130                                     |
| 1000 m.s.n.m                                                      | 140                                     |

*Fuente:* (MVCT, 2017)

#### **8.2.2.3. Cálculo de dotación bruta**

De acuerdo con la resolución 0330 del 2017 la dotación bruta para el diseño de cada uno de los elementos que conforman un sistema de acueducto, indistintamente del nivel de complejidad, se debe calcular teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

#### **Ecuación 3. Cálculo de dotación bruta**

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%p}$$

Dónde:

$d_{bruta}$  = Dotación bruta

$d_{neta}$  = Dotación neta

$\%p$  = Pérdidas máximas admisibles El porcentaje de pérdidas máximas admisibles no deberá superar el 25%

#### **8.2.2.4. Cálculo de demanda**

Para llevar a cabo la proyección de la demanda de agua, en el municipio o en parte de éste, la persona prestadora del servicio de acueducto debe contar con datos de demanda de los últimos 10 años con una frecuencia bimestral, con esta información se debe hacer un análisis estadístico detallado con el fin de encontrar la curva que mejor ajuste el crecimiento de la demanda de agua en ese período (MVCT, 2017).

#### **Demanda de agua por suscriptor**

- **Caudal medio diario**

El caudal medio diario, Qmd, es el caudal calculado para la población teniendo en cuenta la dotación bruta asignada, corresponde al promedio de los consumos diarios de caudal en un período de un año, el cual debe calcularse utilizando la siguiente ecuación (MVCT, 2017):

#### **Ecuación 4. Cálculo caudal medio diario**

$$Qmd = No.habitantes * d_{bruta}$$

Dónde:

$Qmd$  = Caudal medio diario

$d_{bruta}$  = Dotación bruta, dada en Litros/hab\*día

- **Caudal máximo diario**

El caudal máximo diario, QMD, corresponde al consumo máximo registrado durante 24 horas a lo largo de un período de un año. Se calcula multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente de consumo máximo diario  $k_1$ , como se indica en la siguiente ecuación:

***Ecuación 5. Cálculo caudal máximo diario***

$$QMD = Qmd \times k_1$$

Dónde:

$QMD$  = Caudal máximo diario

$Qmd$  = Caudal medio diario

$k_1$  = Coeficiente de consumo máximo diario

El coeficiente de consumo máximo diario  $k_1$ , se obtiene de la relación entre el mayor consumo diario y el consumo medio diario, utilizando los datos registrados en un período mínimo de un año. El valor del coeficiente de consumo máximo diario  $k_1$ , será 1,2 (MVCT, 2017).

#### ***8.2.2.5. Diseño general de las diferentes partes un acueducto***

- **Fuente de abastecimiento**

Para la fuente de abastecimiento se tuvieron en cuenta los parámetros de la tabla 12 ya que a pesar de que las fuentes de agua localizadas en ríos pequeños y en quebradas de montaña frecuentemente son limpias y puras; en estado natural son apropiadas para el consumo humano. No obstante, estas aguas están fácilmente expuestas a contaminación (MVCT, 2017). Por esto, no pueden considerarse potables a menos que se tomen las medidas apropiadas para su protección: instalación de plantas de tratamiento de agua, vigilancia de la cuenca, colocación de carteles o letreros y/o cercas para impedir la invasión de personas y/o animales (MVCT, 2017).

**Tabla 15. Parámetro por medir para determinar la calidad del agua de la fuente  
(Decreto 1575 de 2007 - Resolución 2115 de 2007)**

| Características                                                                | Valor máximo admisible | Procedimientos analíticos recomendados |                      | Parámetros de comparación de la calidad de la fuente recomendados según el nivel calidad de la fuente |         |            |                |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|----------------|
|                                                                                |                        | Norma técnica NTC                      | Standard Method ASTM | Aceptable                                                                                             | Regular | Deficiente | Muy deficiente |
| MICROBIOLÓGICAS                                                                |                        |                                        |                      |                                                                                                       |         |            |                |
| Coliformes totales UFC/100 cm³                                                 | 0                      |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| <i>Escherichia coli</i> UFC/100 cm3                                            | 0                      |                                        | D 5392               |                                                                                                       |         | X          | X              |
| FÍSICAS                                                                        |                        |                                        |                      |                                                                                                       |         |            |                |
| Ph                                                                             | 6,5 – 9,0              |                                        | D 1293               | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Turbiedad UNT                                                                  | <2                     | 4707                                   | D 1889               | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Color aparente UPC                                                             | <15                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Conductividad US/cm                                                            | 1.000                  |                                        | D 1125               | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Olor y sabor                                                                   | Aceptable              |                                        | D 1292               | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA |                        |                                        |                      |                                                                                                       |         |            |                |
| Antimonio - mg/l                                                               | 0,02                   |                                        | D 3697               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Arsénico - mg/l                                                                | 0,01                   |                                        | D 2972               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Bario - mg/l                                                                   | 0,7                    |                                        | D 4382               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Cadmio - mg/l                                                                  | 0,003                  |                                        | D 3557               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Cianuro libre y disociable - mg/l                                              | 0,05                   |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Cobre - mg/l                                                                   | 1,0                    |                                        | D 1688               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Cromo total - mg/l                                                             | 0,05                   |                                        | D 1687               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Mercurio - mg/l                                                                | 0,001                  |                                        | D 3223               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Níquel - mg/l                                                                  | 0,02                   |                                        | D 1886               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Plomo - mg/l                                                                   | 0,01                   |                                        | D 3559               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Selenio                                                                        | 0,01                   |                                        | D 3859               |                                                                                                       |         |            | X              |
| Thi halometanos totales                                                        | 0,2                    |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)                                    | 0,01                   |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |

| Características                                                                 | Valor máximo admisible | Procedimientos analíticos recomendados |                      | Parámetros de comparación de la calidad de la fuente recomendados según el nivel calidad de la fuente |         |            |                |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|----------------|
|                                                                                 |                        | Norma técnica NTC                      | Standard Method ASTM | Aceptable                                                                                             | Regular | Deficiente | Muy deficiente |
| QUÍMICAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA                         |                        |                                        |                      |                                                                                                       |         |            |                |
| Carbono orgánico total - mg/l                                                   | 5                      |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | x              |
| Nitritos - mg/l                                                                 | 0,1                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Nitratos - mg/l                                                                 | 10                     |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Fluoruros - mg/l                                                                | 1,0                    |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| QUÍMICAS QUE TIENEN CONSECUENCIAS ECONÓMICAS E INDIRECTAS SOBRE LA SALUD HUMANA |                        |                                        |                      |                                                                                                       |         |            |                |
| Calcio - mg/l                                                                   | 60                     |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Alcalinidad total - mg/l                                                        | 200                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Cloruros - mg/l                                                                 | 250                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Aluminio - mg/l                                                                 | 0,2                    |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Dureza total - mg/l                                                             | 300                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Hierro total - mg/l                                                             | 0,3                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Magnesio - mg/l                                                                 | 36                     |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Manganeso - mg/l                                                                | 0,1                    |                                        |                      |                                                                                                       |         | X          | X              |
| Molibdeno - mg/l                                                                | 0,07                   |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Sulfatos - mg/l                                                                 | 250                    |                                        |                      | X                                                                                                     | X       | X          | X              |
| Zing - mg/l                                                                     | 3                      |                                        |                      |                                                                                                       |         |            | X              |
| Fosfatos - mg/l                                                                 | 0,5                    |                                        |                      |                                                                                                       |         | X          | X              |

Fuente: (MVCT, 2017)

- **Periodo de diseño**

Según la resolución 0330 de 2017 en su artículo 40 se escribe que para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo se adopta como periodo de diseño 25 años (MVCT, 2017).

- **Obras de captación**

El primer paso para el diseño de la bocatoma es verificar que el caudal de diseño, caudal máximo diario, sea inferior al caudal mínimo del río en el sitio de captación. Con el fin de obtener el caudal mínimo del río se puede recurrir a datos de medición

de caudal de la cuenca, a mediciones de caudal directas o al estudio hidrológico de la cuenca. La presa y la garganta de la bocatoma se diseñan como un vertedero rectangular con doble contracción, cuya ecuación corresponde a:

***Ecuación 6. Cálculo de la presa y garganta de la bocatoma***

$$Q = 1,84L H^{1.5}$$

Dónde:

$Q$  = Caudal de diseño

$L$  = Longitud de la captación

$H$  = Profundidad de la lámina de agua

Con el fin de determinar el valor de la lámina de agua para las condiciones de diseño ( $Q_{máxdiario}$ ) y para las condiciones máximas y mínimas del río, se despeja el valor  $H$  de la ecuación 6:

***Ecuación 7. Cálculo de la altura de la lámina de agua***

$$H = \left( \frac{Q}{1,84 L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Dónde:

$Q$  = Caudal de diseño

$L$  = Longitud de la captación

$H$  = Profundidad de la lámina de agua

A causa de la existencia de las contracciones laterales, se debe hacer la correspondiente corrección de la longitud del vertedero:

***Ecuación 8. Cálculo longitud del vertedero***

$$L' = L - 0,1 n H$$

Dónde:

$L'$  = Longitud del vertedero

$L$  = Longitud de la captación

$H$  = Profundidad de la lámina de agua

$n$  = Número de contracciones

La velocidad del agua al pasar por la rejilla será de:

### ***Ecuación 9. Cálculo velocidad del agua***

$$V = \frac{Q}{L'H}$$

Dónde:

$V$  = Velocidad del agua

$Q$  = Caudal de diseño

$L'$  = Longitud del vertedero

$H$  = Profundidad de la lámina de agua

Y debe estar comprendida entre 0,3 y 3,0 m/s, de manera que puedan ser aplicables las ecuaciones del alcance del chorro presentadas a continuación para determinar el ancho del canal de aducción.

- **Diseño de la rejilla y del canal de aducción**

#### ***Ancho del canal de aducción***

### ***Ecuación 10. Cálculo ancho del canal de aducción***

$$X_s = 0,36 V^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_I = 0,18 V^{\frac{4}{7}} + 0,74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$B = X_s + 0,10$$

Dónde:

$X_s$  = Alcance filo superior

$X_I$  = Alcance fijo inferior

$V$  = Velocidad del río

$H$  = Profundidad de la lámina de agua sobre la presa

$B$  = Ancho del canal de aducción

- **Rejilla**

Si se utiliza una rejilla con barrotes en la dirección del flujo, el área neta de la rejilla se determina según la siguiente expresión:

***Ecuación 11. Cálculo área neta de la rejilla***

$$A_{neta} = aBN$$

Dónde:

$A_{neta}$  = Área neta de la rejilla

$a$  = Separación entre barrotes

$N$  = Número de orificios entre barrotes

$B$  = Ancho del canal de aducción

Siendo  $b$  el diámetro de cada barrote, la superficie total de la rejilla es aproximadamente:

***Ecuación 12. Cálculo área total de la rejilla***

$$A_{total} = (a + b)BN$$

Dónde:

$A_{total}$  = Área neta de la rejilla

$a$  = Separación entre barrotes

$N$  = Número de orificios entre barrotes

$B$  = Ancho del canal de aducción

$b$  = Diámetro del barrote

Haciendo la relación entre área neta y área total, se obtiene:

***Ecuación 13. Relación entre área neta y área total***

$$\frac{A_{neta}}{A_{total}} = \frac{a}{a + b}$$

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} A_{total}$$

Y reemplazando el área total en función de la longitud de la rejilla,  $L_r$ :

***Ecuación 14. Cálculo área total en función de la longitud***

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} BL_r$$

Por otra parte, el caudal a través de la rejilla es:

***Ecuación 15. Cálculo caudal a través de la rejilla***

$$Q = KA_{neta}V_b$$

Dónde:

$Q$  = Caudal a través de la rejilla

$K = 0,9$  para flujo paralelo a la sección

$V_b$  = Velocidad entre barrotes (máximo de 0,2 m/s, para disminuir el arrastre de sólidos hacia la rejilla).

$A_{neta}$  = Área neta de la rejilla

• **Niveles en el canal de aducción**

Suponiendo que todo el volumen de agua se capta al inicio del canal, el nivel de la lámina aguas arriba se obtiene por medio del análisis de cantidad de movimiento en el canal:

***Ecuación 16. Cálculo niveles en el canal de aducción***

$$h_0 = \left[ 2h_e^2 + \left( h_e - \frac{iL_c}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}iL_c$$

Para que la entrega a la cámara de recolección se haga en descarga libre, se debe cumplir que:

$$h_e = h_c$$

$$h_c = \left( \frac{Q^2}{gB^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Dónde:

$h_0$  = profundidad aguas arriba

$h_e$  = profundidad aguas abajo

$h_c$  = profundidad crítica

$i$  = pendiente del fondo del canal

$g$  = aceleración de la gravedad

$L_c$  = Longitud del canal. Longitud de la rejilla más espesor del muro

$Q$  = Caudal de diseño



$B$ = Ancho del canal de aducción

- **Diseño de la cámara de recolección**

Nuevamente, se aplica las ecuaciones del alcance de un chorro de agua, remplazando los términos por los de la condición de entrada a la cámara:

***Ecuación 17. Cálculo de cámara de recolección***

$$X_s = 0,36 V^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_I = 0,18 V^{\frac{4}{7}} + 0,74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$L_c = X_s + 0,30$$

Dónde:

$X_s$ = Alcance filo superior

$X_I$  = Alcance fijo inferior

$V$  = Velocidad del río

$H$  = Profundidad de la lámina de agua sobre la presa

$L_c$  = Longitud del canal de aducción

Se debe tener en cuenta que, aunque se requieren los cálculos hidráulicos para establecer las condiciones mínimas de la cámara de recolección, es importante que las dimensiones de la cámara sean las mínimas necesarias para realizar un adecuado mantenimiento de ésta.

La profundidad  $H$ , debe ser tal que cubra las pérdidas por entrada y fricción de la tubería de conducción entre bocatoma y desarenador.

- **Diseño de desarenador**

En el caso que se requiera el uso de un desarenador, éste debe instalarse en el primer tramo de la aducción, lo más cerca posible a la captación de agua, de acuerdo con las condiciones topográficas y geológicas de la zona. Preferiblemente, los desarenadores deben ser del tipo auto limpiante (López, 2003). Los desarenadores deben contener canales o pasos directos para su operación mientras se efectúa el mantenimiento, usual en casos de los niveles de complejidad del sistema bajo y medio (López, 2003).

Según el RAS (2017) en el Título B, la velocidad de asentamiento vertical de una partícula sedimentable se calcula como función de la temperatura del agua y el peso específico de dicha partícula. Para el caso particular de desarenadores, el peso

específico de las partículas de arenas que serán removidas por el desarenador se puede suponer igual que  $2.65 \text{ gr/cm}^3$  (MVCT, 2017).

***Ecuación 18. Cálculo área del desarenador***

$$A = \frac{Q}{q}$$

Dónde:

$A$  = Área desarenador

$Q$  = Caudal de diseño

$q$  = Carga o caudal unitario

Para una remoción del 80% en el desarenador y manejando un criterio de diseño según Arturo L., (1990)  $V_s/V_o=4$  por tanto despejando la velocidad del agua:

***Ecuación 19. Cálculo velocidad del agua***

$$V_a = 4V_o$$

Dónde:

$V_a$  = Velocidad del agua dentro del desarenador

$V_o$  = Velocidad inicial

Si  $V_h/V_o$  es igual a 15 por criterio de diseño según Arturo L., (1990) despejando  $V_h$ :

***Ecuación 20. Cálculo velocidad horizontal del agua***

$$V_h = 15 * V_o$$

Dónde:

$V_h$  = Velocidad horizontal

$V_o$  = Velocidad inicial

Para el tiempo de sedimentación según Arturo L., (1990) es:

***Ecuación 21. Cálculo tiempo de sedimentación***

$$t_o = L/V_h$$

Dónde:

$t_o$  = Tiempo de sedimentación

$L$  = Longitud del desarenador

$V_h$  = Velocidad horizontal

Para hallar la profundidad del desarenador siendo  $h_o$  según Arturo L., (1990) se calcula:

***Ecuación 22. Cálculo profundidad del desarenador***

$$h_o = V_o * t_o$$

Dónde:

$h_o$  = Profundidad del desarenador

$V_o$  = Velocidad inicial

$t_o$  = Tiempo de sedimentación

Para calcular el volumen del sedimentador según Arturo L., (1990) se calcula mediante la ecuación:

***Ecuación 23. Cálculo volumen del sedimentador***

$$V_{ols} = B * L * h_o$$

Dónde:

$V_{ols}$  = Volumen del sedimentador

$B$  = Ancho del desarenador

$L$  = Longitud del desarenador

$h_o$  = Profundidad del desarenador

Para comprobar el tiempo de sedimentación ( $t_o$ ) Arturo L., (1990) sugiere la siguiente ecuación:

***Ecuación 24. Cálculo comprobación del tiempo de sedimentación***

$$t_o = V_{ols} / Q$$

Dónde:

$t_o$  = Tiempo de sedimentación

$V_{ols}$  = Volumen del sedimentador

$Q$  = Caudal de diseño

Para comprobar  $V_h$  Arturo L., (1990) plantea la siguiente ecuación:

***Ecuación 25. Cálculo comprobación velocidad horizontal***

$$V_h = \frac{Q}{B * h_o}$$

Dónde:

$V_h$  = Velocidad horizontal

$Q$  = Caudal de diseño

$B$  = Ancho del desarenador

$h_o$  = Profundidad del desarenador

Para hallar la velocidad de sedimentación de la partícula ( $V_{sp}$ ) se toma en cuenta que el material a retirar son arenas de diferentes tamaños, se toman partículas más finas con un diámetro mínimo de 0,05 mm (Tamayo et al., 2014); el peso específico de la partícula  $2,65 \text{ g/cm}^3$  (Arturo L., 1990), la temperatura media del agua tomada en campo fue  $18^\circ \text{C}$  por esto el peso específico del agua es  $1,00 \text{ g/cm}^3$  y la viscosidad cinemática es  $1,0618 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  (ver Anexo Registro fotográfico).

#### ***Ecuación 26. Cálculo velocidad de sedimentación de la partícula***

$$V_{sp} = \frac{(v_s - r) \times d^2 \times g}{18 \times \mu}$$

Dónde:

$V_{sp}$  = Velocidad de sedimentación

$v_s$  = Densidad de la partícula de arena

$r$  = Densidad del agua

$d$  = Diámetro de la partícula de arena

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\mu$  = Viscosidad cinemática del agua

Para calcular la velocidad de suspensión según Arturo L., (1990) se usa la siguiente ecuación:

#### ***Ecuación 27. Cálculo velocidad de suspensión***

$$V_k = \sqrt{\frac{8k}{f} * g * (v_s - 1) * d^2}$$

Dónde:

$V_k$  = Velocidad de suspensión

$k$  = Constante 0.04 adimensional

$f$  = Constante 0,03 adimensional

$g$  = Aceleración de la gravedad

$v_s$  = Densidad de la partícula de arena

$d$  = Diámetro de la partícula de arena

La velocidad de salida sobre el vertedero ( $V_{sv}$ ) se halla con la siguiente ecuación:

***Ecuación 28. Cálculo velocidad de salida sobre el vertedero***

$$V_{sv} = \frac{Q}{BH}$$

Dónde:

$V_{sv}$  = Velocidad de salida

$Q$  = Caudal de diseño

$B$  = Ancho del desarenador

$H$  = Alcance horizontal del agua después del vertedero

Se deben conocer el alcance superior del filete de agua en el alcance horizontal siendo  $X_s$  el alcance superior, para esto se utiliza la siguiente ecuación:

***Ecuación 29. Cálculo alcance superior del filete de agua***

$$X_s = 0,36 V_{sv}^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

Dónde:

$X_s$  = Alcance superior

$V_{sv}$  = Velocidad de salida

$H$  = Alcance horizontal del agua después del vertedero

Para el volumen de lodos, las pendientes según Arturo L., (1990) quedan iguales a:

***Ecuación 30. Cálculo pendiente de volumen de lodos***

$$a) \frac{0,30}{1/3L} = 9\%$$

$$b) \frac{0,30}{\frac{2}{3L}} = 4,5\%$$

- **Volumen Tanque de almacenamiento**

El objetivo del tanque de almacenamiento o de distribución es mantener un depósito permanente de agua, suficiente para abastecer la demanda de la red en las horas de gran consumo o permitir su almacenamiento en las horas de la noche cuando el consumo disminuye, el cálculo del volumen del tanque se realiza teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

***Ecuación 31. Cálculo volumen del tanque de almacenamiento***

$$V_T = C_{max} + C_{min} * Q * 3600$$

Dónde:

$V_T$  = Volumen del tanque de almacenamiento

$C_{max}$  = Consumo máximo

$C_{min}$  = Consumo mínimo

$Q$  = Caudal de diseño

Cabe resaltar que para el desarrollo de todo el análisis metodológico se tuvieron en cuenta las técnicas e instrumentos que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 16. Desarrollo Análisis Metodológico**

| Objetivo General                                                                                                            | Objetivos Específicos                                                                                            | Actividades                                                    | Técnica                                                                                                                                                             | Instrumentos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Entregables                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Propuesta de optimización técnico-ambiental para el acueducto Regional Arabia en el municipio de Viotá, Cundinamarca</b> | <b>Diagnosticar el estado actual de la capacidad y el funcionamiento del acueducto de la vereda La Magdalena</b> | Levantamiento de línea base general del territorio.            | -Revisión y selección de las características generales de la zona de estudio.                                                                                       | -Plan de Desarrollo Municipal, PGIRS, Visita a Planeación, visita a Gobernación y visita a Empresa de Servicios Públicos de Viotá<br><br>-Análisis de agua bajo los estándares y las técnicas utilizadas en la resolución 2115 del 2007 y el IRCA.<br><br>-Libro de Acueductos de López Cualla, información brindada por la administración del acueducto: consumos y estructuras.<br><br>-Recolección de información en campo por medio de diario de campo. | -Selección de información reflejada en el marco geográfico.<br><br>-Análisis de laboratorio realizados por la empresa Analquim Ltda.<br><br>-Análisis obtenidos del año 2015 para su comparación con los realizados.<br><br>-Diagnostico constructivo, operativo y de mantenimiento de cada una de las partes del acueducto. |
|                                                                                                                             |                                                                                                                  | Toma de muestras de calidad de agua en la fuente.              | -Uso de métodos para realizar la toma de muestras físicoquímicas, organolépticas y microbiológicas.                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                             |                                                                                                                  | Levantamiento de diagnóstico de la estructura del acueducto.   | -Análisis de los datos por medio de soporte de la normatividad.                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                             |                                                                                                                  | Levantamiento de información del funcionamiento del acueducto. | - Análisis de las características: constructivas, operativas y de mantenimiento.<br><br>-Procesamiento de información brindada por la administración del acueducto. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|  |                                                                            |                                                                        |                                                                                     |                                                                                                         |                                                                                                                                                                       |
|--|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>Identificar metodologías aplicables a la optimización del acueducto</b> | -Diseñar la matriz de evaluación de alternativas de potabilización.    | -Revisión bibliográfica para la realización de ecuaciones de diseño.                | -Libros de acueductos y alcantarillados, RAS 2017 Títulos A, B y C.                                     | -Matriz de evaluación con las diferentes alternativas teniendo en cuenta costos y eficiencia para la calidad del agua correspondiente a la de la Quebrada La Ruidosa. |
|  |                                                                            | -Recalcular el diseño del acueducto.                                   | -Para la potabilización las dos grandes técnicas son: Clarificación y Desinfección. | -Coagulación (coagulante), Floculación (Floculador), filtración (Filtro), sedimentación (Sedimentador). | -Cálculos de diseño de optimización del acueducto.                                                                                                                    |
|  |                                                                            | -Realizar el diseño del correspondiente del sistema de potabilización. | -Evaluación de alternativas por ponderación.                                        | -Matriz de doble entrada con ponderación numérica de 1 a 5.                                             | -Cálculos del diseño del sistema de potabilización correspondiente a la calidad del agua de la Quebrada La Ruidosa.                                                   |
|  | <b>Estimar el presupuesto de la optimización del acueducto</b>             | -Estimación de costos de construcción y de químicos requeridos.        | -Análisis documental                                                                | -Lista de precios                                                                                       | -Presupuesto total                                                                                                                                                    |
|  |                                                                            | -Estimación de mano de obra, transporte y costos adicionales.          | -Análisis de información primaria                                                   | -Cotizaciones                                                                                           | -Estimación de variación y comparación de costos con diferentes metodologías.                                                                                         |



## 9. Resultados

### 9.1. Resultados Objetivo 1. Diagnostico de estado actual de la capacidad y el funcionamiento del acueducto Regional Arabia

*Tabla 17. Resultados trabajo de campo*

| Parte del acueducto | Diagnóstico  |           |               | Observaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Fotografía                                                                           |
|---------------------|--------------|-----------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | Constructivo | Operativo | Mantenimiento |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                      |
| <b>Bocatoma</b>     | <b>X</b>     | <b>X</b>  |               | <p>La bocatoma cumple con las especificaciones, también con el tamaño y se necesita verificar el caudal captado y el tamaño de la reja, de igual manera operativa cumple a cabalidad su función.</p> <p>Por otro lado, no cumple con mantenimiento teniendo en cuenta que al momento de la visita se observó que la reja se encuentra en algunas secciones deterioradas y en otras no tiene la reja correspondiente esto debido a las crecientes súbitas. La bocatoma es de fondo y se encuentra en la parte alta de la quebrada.</p> |  |

|                    |          |          |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                      |
|--------------------|----------|----------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conducción</b>  | <b>X</b> | <b>X</b> |  | <p>La conducción por observación en visita de campo se encuentra de manera organizada con funcionamiento a partir de gravedad, en la parte constructiva posee material de PVC con diámetro de 3 pulgadas, también se observa que por ser un acueducto rural y comunitario las líneas de conducción están dentro de la vegetación, la conducción tiene en cuenta las pendientes del terreno y solo se observan fugas por temas de mantenimiento debido a las crecientes y a las esporádicas remociones en masa que puedan ocurrir en la zonas por donde pasa.</p> |   |
| <b>Desarenador</b> | <b>X</b> |          |  | <p>Se observó una estructura en concreto que no presenta grietas, ni fugas, más sin embargo en la parte operativa y de mantenimiento es explícito y erróneo afirmar que los desarenadores cumplen con el debido funcionamiento y mantenimiento teniendo en cuenta que estos son cajas cerradas no se pudo observar de forma directa en que funciona.</p>                                                                                                                                                                                                         |  |
| <b>PTAP</b>        |          |          |  | <p>El acueducto Regional Arabia no cuenta con ningún tipo de sistema de potabilización y/o tratamiento.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                      |

|                |          |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                     |
|----------------|----------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tanques</b> | <b>X</b> | <b>X</b> | Los tanques cumplen con su debida cámara de quiebre para aligerar presiones, en la parte constructiva, los tanques son de concreto, no presentan grietas, no se encuentran fracturados ni ladeados, por parte del mantenimiento se pudo observar que presentan un mantenimiento constante ya que no tienen partes con moho o algún tipo de biopelícula en su interior, de igual manera las tapas no se encuentran oxidadas y tampoco poseen ningún tipo de fractura por donde pueda ingresar algún contaminante. |  |
|----------------|----------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|

Fuente: (Autores, 2018)

**Tabla 18. Análisis de calidad del agua entregada por la administración del Acueducto Regional Arabia - 2015**

| Reporte de resultados          |                |                    |                            |
|--------------------------------|----------------|--------------------|----------------------------|
| Parámetro                      | Unidad         | Valor              | Valor de referencia límite |
| Coliformes totales             | UFC/100mL      | $>2,4 \times 10^3$ | 0                          |
| Recuento de <i>Escherichia</i> | UFC/100mL      | $1,1 \times 10^2$  | 0                          |
| <i>Giardia</i>                 | No Quistes/10L | 4                  | 0                          |
| <i>Cryptosporidium</i>         | No Quistes/10L | 1                  | 0                          |

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR (2015)

**Tabla 19. Análisis de calidad del agua realizado por el Laboratorio Analquim - 2018**

| Reporte de resultados   |           |                   |                            |
|-------------------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| Parámetro               | Unidad    | Valor             | Valor de referencia límite |
| Turbiedad               | UNIT      | 3,25              | 2                          |
| Coliformes totales      | UFC/100mL | $2,6 \times 10^4$ | 0                          |
| <i>Escherichia Coli</i> | UFC/100mL | 30                | 0                          |

Fuente: Laboratorio Analquim Ltda. (2018)

**Nota 1: Para verificación de resultados de laboratorio ver análisis completo en el Anexo**

**Nota 2: Análisis de laboratorio realizados bajo la Resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Salud y Protección Social**

## 9.2. Resultados Objetivo 2. Identificar las metodologías aplicables a la optimización del acueducto.

- **Cálculo de la proyección de la población**

Para la proyección de la población a abastecer y/o de los suscriptores, se utilizó el método de proyección geométrico, se escogió teniendo en cuenta la siguiente tabla correspondiente al título B del (RAS), este método puede ser utilizado en sistemas de baja complejidad como lo es actualmente el sistema de usuarios abastecido por el acueducto Regional Arabia teniendo en cuenta que los 444 suscriptores corresponden a 2.220 habitantes aproximadamente; de igual manera en el título B del (RAS) se hace referencia a que el método geométrico es útil en poblaciones que muestren una importante actividad económica, que genera un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión las cuales pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades; por esto tanto la zona de influencia como el municipio en general cuenta con una gran actividad económica en el sector agropecuario por ser este municipio capital cafetera de Cundinamarca, así mismo presenta pequeñas producciones de frutales y caña de azúcar, sin dejar de lado la producción de ganado para sacrificio local y una alta producción avícola.

**Tabla 20. Cálculo para proyecciones según el nivel de complejidad**

| Nivel de Complejidad del Sistema           |      |       |            |      |
|--------------------------------------------|------|-------|------------|------|
| Método por emplear                         | 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    |
| Método gráfico                             | X    | X     |            |      |

Fuente: (MVCT, 2017)

### **Desarrollo de Ecuaciones**

Se desarrollan a continuación las ecuaciones correspondientes al cálculo de proyección descritas en la metodología:

#### **Ecuación 1**

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

$$P_f = 444 (1 + 0.037)^{2043 - 2017}$$

$$P_f = 1.141,9 \approx 1.142$$

$$\frac{2.220}{444} = 5 \text{ habitates} * \text{usuario}$$

$$1.142 * 5 = 5.710 \text{ habitantes}$$

#### ***Ecuación 2***

$$r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc}-T_{ci})}} - 1$$

$$r = \left( \frac{444}{428} \right)^{\frac{1}{(2017-2016)}} - 1$$

$$r = 0,037$$

- **Cálculo de dotaciones**

Teniendo en cuenta la Tabla 11 descrita en la metodología en donde se dio a conocer el valor de la dotación neta correspondiente para la zona de estudio de este proyecto se toma el valor de 140 L/hab\*día.

#### ***Ecuación 3***

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%p}$$

$$d_{bruta} = \frac{140 \frac{L}{hab * dia}}{1 - 0\%}$$

$$d_{bruta} = \frac{140 L}{hab * dia}$$

#### ***Ecuación 4***

$$Qmd = No. hab \times d_{bruta}$$

$$Qmd = 5.710 hb * 140 \frac{L}{hb * d}$$

$$Qmd = 799.400 L/d$$

#### ***Ecuación 5***

$$QMD = 1.2 * 799.400 L/d$$

$$QMD = 959.280 L/d$$

$$959.280 \frac{L}{d} * \frac{1 m^3}{1.000 L} * \frac{d}{86.400 s} = 11,1 \times 10^{-3} \approx 0,01 m^3/s$$

- **Cálculo optimización bocatoma de fondo**

Como el acueducto Regional Arabia cuenta con una bocatoma de fondo como estructura de captación, que se encuentra en estado de deterioro debido a la falta de rejilla y mantenimiento de concretos, se procede a recalcular la estructura para las condiciones actuales y futuras de abastecimiento de agua, buscando dar uso a la actual en lugar de realizar una inversión mayor en uno nuevo. (Ver tabla 17).

La estructura de captación se realiza a partir de las siguientes ecuaciones:

***Ecuación 6***

$$Q = 1,84 L H^{1.5}$$

A partir de la ecuación número 6 se despeja el valor de H para calcular la lámina de agua tomando como Q el caudal de diseño.

***Ecuación 7***

$$H = \left( \frac{Q}{1,84 L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Atendiendo las recomendaciones del RAS 2017, Tabla 2, Artículo 47, se realiza el cálculo del caudal de diseño, siendo este hasta dos veces el caudal máximo diario para fuentes superficiales. Luego:

$$QMD = 0,01 m^3/s * 2 = 0,02 m^3/s$$

Teniendo en cuenta lo anterior y reemplazando en la ecuación 7:

$$H = \left( \frac{0,02 m^3/s}{1,84 * 2,50 m} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = 0,027 m$$

Posteriormente se determina la longitud del vertedero y la velocidad del agua a partir del resultado de la ecuación 7 y tomando como n=2 como se observa en la Tabla 17, el número de contracciones las cuales son 2:

***Ecuación 8***

$$L' = L - 0,1 n H$$

$$L' = 2,50 - 0,1 * 2 * 0,027$$

$$L' = 2,49 \text{ m}$$

***Ecuación 9***

$$V_1 = \frac{Q}{L'H}$$

$$V_1 = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{2,49 \text{ m} * 0,027 \text{ m}}$$

$$V_1 = 0,29 \approx 0,3 \text{ m/s}$$

- **Diseño canal de aducción y rejilla**

Para calcular el canal de aducción, es necesario conocer los alcances tanto superior como inferior de los filetes de agua siendo  $X_s$  el alcance superior y  $X_I$  el alcance inferior.

***Ecuación 10***

$$X_s = 0,36 V^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_I = 0,18 V^{\frac{4}{7}} + 0,74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$B = X_s + 0,10$$

$$X_s = 0,36 (0,3)^{\frac{2}{3}} + 0,60 (0,027)^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0,237 \approx 0,24 \text{ m}$$

$$X_I = 0,18 (0,3)^{\frac{4}{7}} + 0,74 (0,027)^{\frac{3}{4}}$$

$$X_I = 0,139 \approx 0,14$$

$$B = 0,24 + 0,10$$

$$B = 0,34 \text{ m} - \text{Ancho a optimizar}$$

Como una de las partes importante de la bocatoma se encuentra el diseño de la rejilla en donde se realiza a partir de las siguientes ecuaciones:

Siendo la separación entre barrotes de 0,0636 m  $\approx$  0,064 m y 13 el número de agujeros entre barrotes.

***Ecuación 11***

$$A_{neta} = aBN$$

$$A_{neta} = 0,064 \text{ m} * 0,34 \text{ m} * 13$$

$$A_{neta} = 0,28 \text{ m}^2$$

Siendo el diámetro de cada barrote b=3/4” que en metros es 0,0191 m.

***Ecuación 12***

$$A_{total} = (a + b)BN$$

$$A_{total} = (0,064 \text{ m} + 0,0191 \text{ m}) 0,34 \text{ m} * 13$$

$$A_{total} = 0,367 \text{ m}^2 \approx 0,37 \text{ m}^2$$

***Ecuación 13***

$$\frac{A_{neta}}{A_{total}} = \frac{a}{a + b}$$

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} A_{total}$$

Teniendo en cuenta la relación entre el área neta y el área total demostrada en la ecuación 14 se despeja  $L_r$  y se calcula la longitud de la rejilla:

***Ecuación 14***

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} BL_r$$

$$L_r = \frac{Area_{neta}(a + b)}{B * a}$$



$$L_r = \frac{0,28 \text{ m}^2(0,064 \text{ m} + 0,0191 \text{ m})}{0,34 \text{ m} * 0,064 \text{ m}}$$

$$L_r = 1,069 \text{ m} \approx 1,1 \text{ m} - \text{Largo a optimizar}$$

A partir de la ecuación 14 se recalcula el área neta en función de la longitud

$$A_{neta} = \frac{a}{a + b} B L_r$$

$$A_{neta} = \frac{0,064 \text{ m}}{0,064 \text{ m} + 0,0191 \text{ m}} 0,34 \text{ m} * 1,1 \text{ m}$$

$$A_{neta} = 0,288 \text{ m}^2 \approx 0,29 \text{ m}^2$$

Se verifica el N para asegurar los agujeros que deben ir entre barros

$$N = \frac{Area_{neta}}{a * B}$$

$$N = \frac{0,29}{0,064 * 0,34}$$

$$N = 13,32 \approx 13$$

### ***Ecuación 15***

$$Q = K A_{neta} V_b$$

A partir de la ecuación 15 se despeja la velocidad entre barros siendo esta  $V_b$  tomando parcialmente como Q el caudal de diseño.

$$V_b = \frac{Q}{K A_{neta}}$$

$$V_b = \frac{0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,9 * 0,29 \text{ m}^2}$$

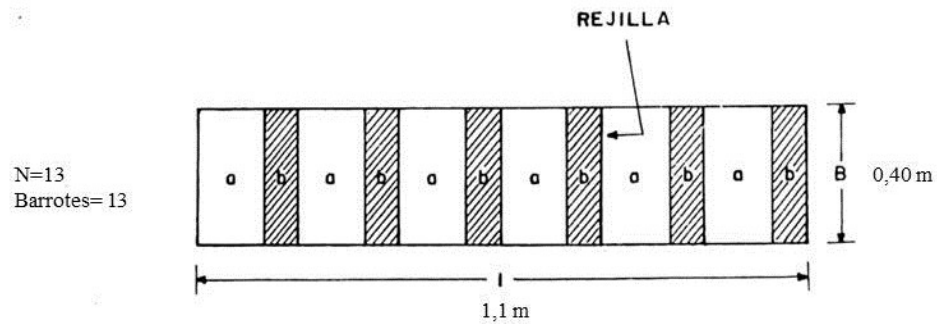
$$V_b = 0,076 \text{ m/s}$$

Al despejar  $V_b$  se toma nuevamente la ecuación 15 y se recalcula el caudal:

$$Q = 0,9 * 0,29 \text{ m}^2 * 0.076 \text{ m/s}$$

$$Q = 0.019 \approx 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

### ***Ilustración 7. Rejilla***



*Fuente:* (Autores, 2018). Adaptado de Arturo, L. (1990)

- **Niveles del canal de aducción**

Al realizar todos los cálculos correspondientes a la bocatoma se debe calcular la cámara de recolección correspondiente para el sistema de captación.

### ***Ecuación 17***

$$X_s = 0,36 V^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_l = 0,18 V^{\frac{4}{7}} + 0,74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$L_c = X_s + 0,30$$

$$X_s = 0,36 (0,3)^{\frac{2}{3}} + 0,60 (0,027)^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0,237 \approx 0,24 \text{ m}$$

$$X_l = 0,18 (0,3)^{\frac{4}{7}} + 0,74 (0,027)^{\frac{3}{4}}$$

$$X_l = 0,139 \approx 0,14 \text{ m}$$

$$L_c = X_s + 0,30$$

$$L_c = 0,24 + 0,30$$

$$L_c = 0,54 \text{ m}$$

**Ecuación 16**

$$h_e = \left( \frac{Q^2}{gB^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_e = \left( \frac{0,02 \text{ m}^2}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,34 \text{ m}^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_e = 0,071$$

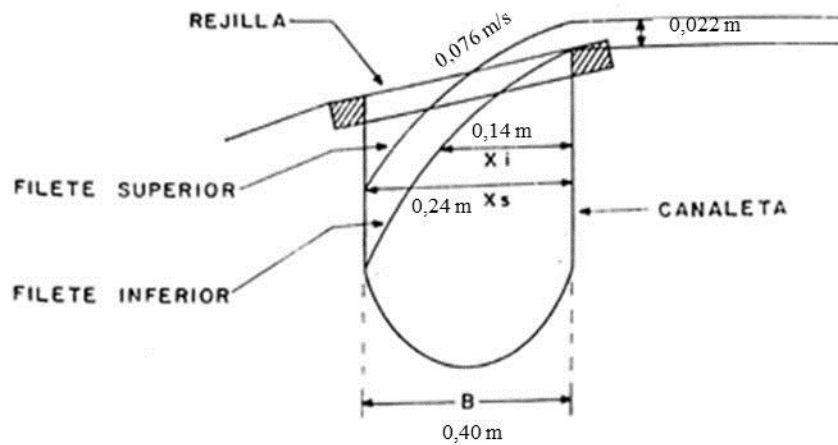
Se toma  $i = 3\%$  de pendiente para el desarrollo de la ecuación 16.

$$h_0 = \left[ 2h_e^2 + \left( h_e - \frac{iL_c}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}iL_c$$

$$h_0 = \left[ 2(0,071)^2 + \left( 0,071 - \frac{(3\%)0,54}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}(3\%)0,54$$

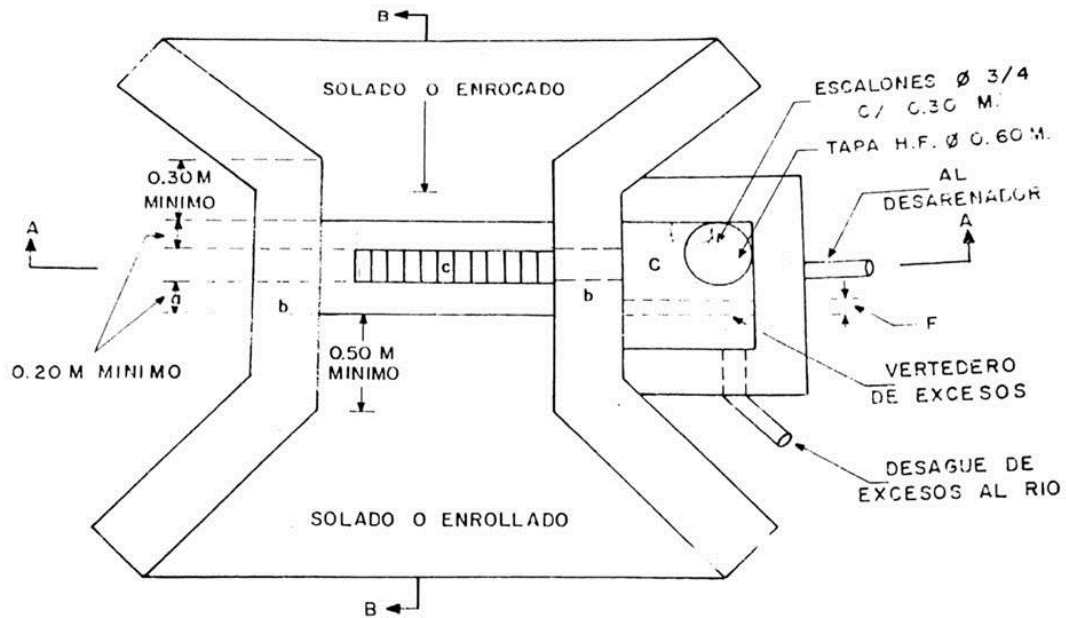
$$h_0 = 0,109 \approx 0,11$$

**Ilustración 8. Canaleta de aducción**



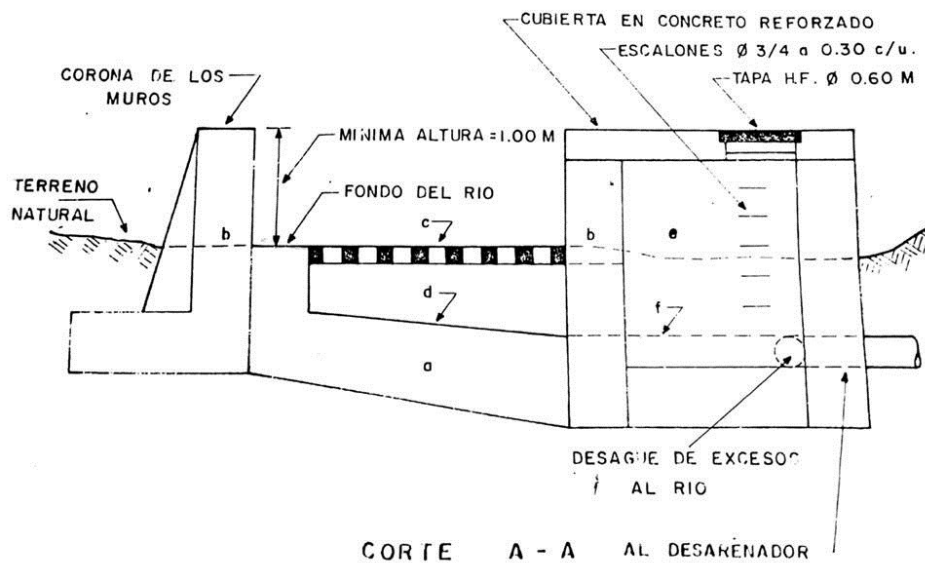
*Fuente:* (Autores, 2018). Adaptado de Arturo, L. (1990)

***Ilustración 9. Bocatoma en planta***



*Fuente:* (Autores, 2018). Adaptado de Arturo, L. (1990)

*Ilustración 10. Bocatoma en corte*



*Fuente:* (Autores, 2018). Adaptado de Arturo, L. (1990)

- **Cálculo optimización del desarenador**

Como el acueducto Regional Arabia cuenta con un desarenador como estructura de remoción de arenas, del cual no se tiene claro si el tamaño y el funcionamiento es el adecuado, se procede a recalcular la estructura para las condiciones actuales y futuras. (Ver Tabla 17).

La estructura de remoción de arenas se realiza a partir de las siguientes ecuaciones:

Para realizar el dimensionamiento del desarenador se debe tener en cuenta que se asume una carga de  $75 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , se dice que la carga ( $q$ ) es igual a caudal/área por tanto según Arturo L., (1990), la velocidad inicial ( $V_o$ ) se calcula a partir de:

$$V_o = 75 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \frac{1 \text{ d}}{86.400 \text{ s}}$$

$$V_o = 0,000866 \text{ m/s} = 0,08668 \text{ cm/s}$$

Para calcular el área del desarenador siendo:

***Ecuación 18***

$$A = \frac{Q}{q}$$

$$A = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{75 \text{ m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}} \cdot 86.400 \text{ s}$$

$$A = 23 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta que A es el área del desarenador y que el área es igual a longitud por ancho según Arturo L., (1990), para desarenadores se tiene una relación de 3:1.

$$A = L \cdot B$$

$$A = B \cdot 3B$$

$$A = 3B^2$$

A partir de la ecuación anterior se despeja B siendo este igual  $\sqrt{\frac{A}{3}}$

$$B = \sqrt{\frac{23 \text{ m}^2}{3}}$$

$B = 2,8 \approx$  por criterio de diseño  $3m \rightarrow$  Tamaño a optimizar

Si la relación del desarenador para el diseño es igual 3:1 entonces:

$$L = 3B$$

$$L = 3 * 3m = 9m \rightarrow \text{Tamaño a optimizar}$$

Para una remoción del 80% en el desarenador y manejando un criterio de diseño según Arturo L., (1990),  $V_s/V_o=4$  por tanto despejando la velocidad del agua:

***Ecuación 19***

$$V_s = 4V_o$$

$$V_s = 4 * 0,08668 \text{ cm/s}$$

$$V_s = 0,347 \text{ cm/s}$$

Si  $V_h/V_o$  es igual a 15 por criterio de diseño según Arturo L., (1990), despejando  $V_h$ :

***Ecuación 20***

$$V_h = 15 * V_o$$

$$V_h = 15 * 0,08668 \text{ cm/s}$$

$$V_h = 1,3002 \text{ cm/s}$$

Para el tiempo de sedimentación según Arturo L., (1990) es:

***Ecuación 21***

$$t_o = L/V_h$$

$$t_o = \frac{900 \text{ cm}}{1,3002 \text{ cm/s}}$$

$$t_o = 11,54 \text{ min} * \frac{1h}{60 \text{ min}} = 0,19 \text{ h}$$

Para hallar la profundidad del desarenador sienta  $h_o$  según Arturo L., (1990) se calcula:

***Ecuación 22***

$$h_o = V_o * t_o$$

$$h_o = 0,08668 \frac{cm}{s} * 11,54 \text{ min} * \frac{60 s}{1 \text{ min}} = 60,02 \text{ cm} = 0,60 \text{ m}$$

$$h_o = 0,60 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

*se deja como criterio de diseño y especificaciones de dimensionamiento del RAS*

Según Arturo L., (1990) si  $V_s < V_o$ , se sedimentan todas las partículas y llegan al punto c.

$$0,347 \text{ m/s} \geq 0,000868 \text{ m/s}$$

*Por lo tanto, se cumple el criterio de diseño*

Para calcular el volumen del sedimentador según Arturo L., (1990) se calcula mediante la ecuación:

***Ecuación 23***

$$V_{ols} = B * L * h_o$$

$$Vols = 3 \text{ m} * 9 \text{ m} * 1 \text{ m}$$

$$Vols = 27 \text{ m}^3$$

Para comprobar el tiempo de sedimentación ( $T_o$ ) Arturo L., (1990) sugiere la siguiente ecuación:

***Ecuación 24***

$$t_o = V_{ols}/Q$$

$$t_o = \frac{27 \text{ m}^3}{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$t_o = 1.350 \text{ s} = 22,5 \text{ min}$$

Para comprobar  $V_h$  Arturo L., (1990) plantea la siguiente ecuación:

***Ecuación 25***

$$V_h = \frac{Q}{B * h_o}$$

$$V_h = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{3 \text{ m} * 1 \text{ m}}$$

$$V_h = 0,006 \text{ m/s} = 0,4 \text{ cm/s}$$

Para hallar la velocidad de sedimentación de la partícula ( $V_{sp}$ ) se toma en cuenta que el material a retirar son arenas de diferentes tamaños se toman partículas más finas con un diámetro mínimo de 0,05 mm (Tamayo, Galvis, García y Ortiz, 2014); el peso específico de la partícula 2,65 g/cm<sup>3</sup> (Arturo L., 1990), la temperatura media del agua tomada en campo fue 18° C por esto el peso específico del agua es 1,00 g/cm<sup>3</sup> y la viscosidad cinemática es 1,0618 x 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/s. (Ver Tabla 17).

**Ecuación 26**

$$V_{sp} = \frac{(p_s - p) \times d^2 \times g}{18 \times \mu}$$

$$V_{sp} = \frac{(2,65 \text{ g/cm}^3 - 1,00 \text{ g/cm}^3) \times (0,005 \text{ cm})^2 \times 981 \text{ cm/s}^2}{18 \times 1,0618 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$V_{sp} = 0,21 \text{ cm/s} \approx 0,0021 \text{ m/s}$$

Se debe rectificar el diámetro de la partícula ya que el anterior diámetro es un diámetro supuesto por esto Arturo L., (1990) calcula el diámetro a partir de la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{18 \times V_{sp} \times \mu}{g \times (p_s - p)}}$$

$$d = \sqrt{\frac{18 \times 0,21 \times 1,0618 \times 10^{-2}}{981 \times (2,65 - 1)}}$$

$$d = 0,0049 \text{ cm} \approx 0,005 \text{ cm}$$

Para calcular la velocidad de suspensión según Arturo L., (1990) se usa la siguiente ecuación:

**Ecuación 27**

$$V_k = \sqrt{\frac{8k}{f} \times g \times (v_s - 1) \times d^2}$$

$$V_k = \sqrt{\frac{8 \times 0,04}{0,03} \times 981 \times (2,65 - 1) \times (0,005 \text{ cm})^2}$$

$$V_k = 9,29 \text{ cm/s}$$



Como criterio de diseño según Arturo L., (1990) Si  $V_k > V_h$  entonces no hay suspensión pues:

$$V_k = 9,29 \text{ cm/s} > V_h = 0,4 \text{ cm/s}$$

Para hallar el alcance horizontal del agua después del vertedero de salida se calcula utilizando la ecuación 6:

$$Q = 1,84 B * H^{\frac{3}{2}}$$

Se despeja igualmente H como en la ecuación 7 antes mencionada y se reemplaza:

$$H = \left( \frac{Q}{1,84B} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = \left( \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{1,84 * 3 \text{ m}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = 0,023 \text{ m}$$

La velocidad de salida sobre el vertedero ( $V_{sv}$ ) es:

**Ecuación 28**

$$V_{sv} = \frac{Q}{BH}$$

$$V_{sv} = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{3 \text{ m} * 0,023 \text{ m}}$$

$$V_{sv} = 0,289 \text{ m/s} \approx 0,29 \text{ m/s}$$

Se deben conocer los alcances tanto superior como inferior de los filetes de agua en el alcance horizontal siendo  $X_s$  el alcance superior para esto se utiliza la siguiente ecuación:

**Ecuación 29**

$$X_s = 0,36 V_{sv}^{\frac{2}{3}} + 0,60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0,36 (0,29)^{\frac{2}{3}} + 0,60 (0,023)^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0,227 \text{ m} \approx 0,30 \text{ m por seguridad}$$

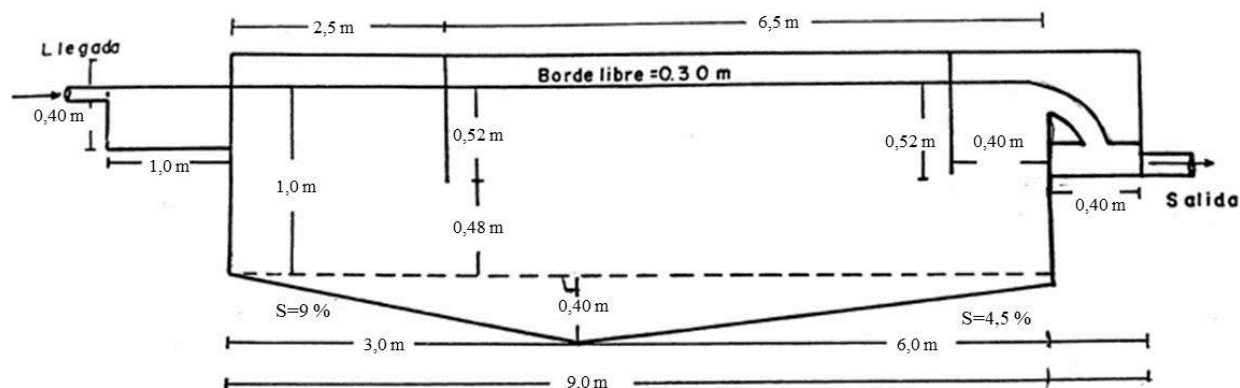
Se adopta un valor de  $X_s = 0,30 \text{ m}$  como profundidad máxima para el volumen de lodos, las pendientes según Arturo L., (1990) quedan iguales a:

**Ecuación 30**

$$a) \frac{0,30}{1/3L} = 9\%$$

$$b) \frac{0,30}{\frac{2}{3L}} = 4,5\%$$

**Ilustración 11. Desarenador**



Fuente: (Autores, 2018). Adaptado de Arturo, L. (1990)

- **Diseño tanque almacenamiento**

Los resultados de la siguiente tabla están calculados a partir de datos obtenidos según el Anexo 4.

**Tabla 21. Resultado consumo horario**

| Consumo Horario |     |
|-----------------|-----|
| Mayor           | 240 |
| Menor           | 185 |

Fuente: (Autores, 2018)

### ***Ecuación 31***

$$V_T = C_{max} + C_{min} * Q * 3.600$$

$$V_T = (2,40 + 1,85) * 0,02m^3/s * 3.600s$$

$$V_T = 135,6m^3$$

$$V_T = 133.202 L$$

- **Diseño del sistema de potabilización**

A partir de la tabla planteada en la metodología (Tabla 13), se realiza el desarrollo con el fin de escoger la alternativa adecuada como sistema de potabilización:

| <b>Tipos</b>               | <b>Eficiencia</b> | <b>Construcción</b> | <b>Operación</b> | <b>Mantenimiento</b> | <b>TOTAL</b> |
|----------------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|--------------|
| Filtración rápida          | 4                 | 3,5                 | 3,5              | 3                    | 3,5          |
| Filtración rápida completa | 4,5               | 3                   | 3,5              | 3,5                  | 3,6          |
| Filtración directa         | 3,5               | 4                   | 4,5              | 3,5                  | 3,9          |
| Filtración Lenta           | 4                 | 3,5                 | 3,5              | 3                    | 3,5          |

*Fuente:* (Autores, 2018)

Los parámetros de evaluación se realizaron con puntuaciones de 1 a 5, siendo 1 el más deficiente y 5 el más óptimo o con menor y mayor facilidad. De igual manera para los resultados se realizó una jerarquización según los puntajes obtenidos.

| <b>Parámetros de evaluación</b> | <b>Puntaje</b> |
|---------------------------------|----------------|
| Deficiente                      | 1-1,9          |
| Regular                         | 2- 2,9         |
| Aceptable                       | 3-3,9          |
| Óptimo                          | 4-5            |

*Fuente:* (Autores, 2018)

- **Diseño de vertedero**

***Ecuación 32. Cálculo del caudal unitario***

$$q = \frac{Q}{B}$$

$$q = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{0,5 \text{ m}}$$

$$q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s} * \text{m}$$

***Ecuación 33. Cálculo de la profundidad crítica***

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{(0,04)^2 \text{ m}^3/\text{s}}{9,81 \text{ m/s}^2}}$$

$$h_c = 0,055 \text{ m}$$

***Ecuación 34. Cálculo de la profundidad antes del resalto hidráulico***

$$h_1 = 0,0198 \text{ m} \approx h_1 = 0,020 \text{ m}; P = 0,7 \text{ m}$$

***Ecuación 35. Cálculo de la velocidad antes del resalto***

$$V_1 = \frac{q}{h_1}$$

$$V_1 = \frac{0,04 \text{ m}^3/\text{s} * \text{m}}{0,020 \text{ m}}$$

$$V_1 = 2 \text{ m/s}$$

***Ecuación 36. Cálculo de número de Froude***

$$NF = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$$
$$NF = \frac{2m/s}{\sqrt{9,81m/s^2 * 0,020m}}$$
$$NF = 4,515$$

***Ecuación 37. Cálculo de la profundidad después del resalto***

$$h_2 = \frac{h_1}{2 * \sqrt{(1 + 8 * NF)^2} - 1}$$
$$h_2 = \frac{0,020m}{2 * \sqrt{(1 + 8 * 4,515)^2} - 1}$$
$$h_2 = 0,117m \approx 0,12m$$

***Ecuación 38. Cálculo de la velocidad después del resalto***

$$V_2 = \frac{q}{h_2}$$
$$V_2 = \frac{0,04m^3/s * m}{0,12m}$$
$$V_2 = 0,33m/s$$

***Ecuación 39. Cálculo de longitud del resalto hidráulico***

$$L_j = 6(h_2 - h_1)$$
$$L_j = 6(0,12m - 0,020m)$$
$$L_j = 0,6m$$

***Ecuación 40. Cálculo de  $L_m$***

$$L_m = 4,3P \left( \frac{h_c}{P} \right)^{0,9}$$

$$L_m = 4,3(0,7) \left( \frac{0,055}{0,7} \right)^{0,9}$$

$$L_m = 0,31m$$

***Ecuación 41. Cálculo de las pérdidas de energía***

$$h_p = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_2h_1}$$

$$h_p = \frac{(0,12 - 0,020)^3}{4(0,12)(0,020)}$$
$$h_p = 0,10$$

***Ecuación 42. Velocidad media en el resalto hidráulico***

$$V_m = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

$$V_m = \frac{(2m^2/s + 0,33m^2/s)}{2}$$

$$V_m = 0,10$$

***Ecuación 43. Cálculo tiempo de mezcla***

$$T_m = \frac{L_j}{V_m}$$

***Ecuación 44. Cálculo gradiente de velocidad***

$$G = \sqrt{\frac{Y}{\mu}} * \sqrt{\frac{h_p}{T_m}}$$

- **Diseño de filtro**

***Caudal diferentes unidades de medida***

$$1 \text{ } Q = 0,02\text{m}^3/\text{s}; Q = 72\text{m}^3/\text{h}; Q = 1.728\text{m}^3/\text{d}; Q = 72\text{L}/\text{s}$$

***Ecuación 45. Cálculo rata o tasa de filtración***

$$V = 200 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * d} = 200 \frac{\text{m}}{d} \rightarrow \text{Asumido}$$

$$V = 200 \frac{\text{m}}{d} * \frac{100\text{cm}}{1\text{m}} * \frac{d}{86.400\text{s}}$$

$$V = 0,23 \text{ cm}/\text{s}$$

***Ecuación 46. Cálculo velocidad mínima***

$$V_{min}: (1 - c)V$$

$$V_{min}: (1 - 0,50) * 200 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * d}$$

$$V_{min} = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * d} = 0,12\text{cm}/\text{s}$$

***Ecuación 47. Cálculo velocidad máxima***

$$V_{max}: (1 + 0,50) * V$$

$$V_{max}: (1 + 0,50) * 200 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * d}$$

$$V_{max}: 300 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * d} = 0,35\text{cm}/\text{s}$$

***Ecuación 48. Cálculo área de filtración***

$$A_T = \frac{Q}{V}$$

$$A_T = \frac{1.728\text{m}^3/\text{d}}{200 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d}$$

$$A_T = 8,64\text{m}^2 \approx 8,7\text{m}^2$$

***Ecuación 49. Cálculo de número de filtros***

$$V_a = 0,70 \text{ m/min} \rightarrow \text{Asumido}$$

$$V_a = 0,70 \frac{\text{m}}{\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} * \frac{100\text{cm}}{1\text{min}} = 1,17\text{cm/s}$$

$$N = \frac{V_a + V_{\max}}{V_{\max}}$$

$$N = \frac{1,17\text{cm/s} + 0,35\text{cm/s}}{0,35\text{cm/s}}$$

$$N = 4,3 \approx 5$$

***Ecuación 50. Cálculo de la forma y dimensión de los filtros***

$$\frac{B}{L} = \frac{N + 1}{2N}$$

$$\frac{B}{L} = \frac{5 * 1}{2 * 5}$$

$$\frac{B}{L} = \frac{6}{10} = 0,06$$

$$B = 0,06L$$

$$A_T = L * B = L * 0,06L$$

$$\frac{A_T}{N} = L * 0,06L$$

$$\frac{8,7\text{m}^2}{5} = 0,06L^2$$

$$1,74 = 0,60 L^2$$

$$L^2 = \frac{1,74}{0,60} = 2,9$$

$$L = \sqrt{2,9} =$$

$$L = 1,70\text{m}$$

$$B = (0,60)(1,7)$$

$$B = 1,02\text{m}$$

$$\text{Chequeo } 1 \leq \frac{L}{B} \leq 3; \frac{L}{B} = \frac{1,70\text{m}}{1,02\text{m}} = 1,7$$



$$1 \leq 1,7 \leq 3 \text{ OK}$$

### ***Características de los medios filtrantes***

Se asume que  $T\varepsilon = 0,55\text{mm} = 0,88\text{mm}$  y  $C\mu = 1,60\text{mm}$  antracita

$$C\mu = \frac{\text{Abertura del tamiz para pasar el 60\%}}{\text{Abertura del tamiz para pasa el 10\%}}$$

$$C\mu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \rightarrow D_{60} = C\mu D_{10}$$

$T\varepsilon = \text{Abertura del tamiz para pasar el 10\%}$

$$\begin{aligned} T\varepsilon &= D_{10} \\ D_{60} &= 1,60\text{mm} * 0,55\text{mm} \\ D_{60} &= 0,88\text{mm} \end{aligned}$$

### ***Antracita***

$$D_{90} \text{ antracita} = C D_{10}(\text{arena})$$

Para que exista mezcla parcial de la siguiente tabla se obtiene C

***Tabla 22. Condiciones de mezcla para filtros***

| Condiciones de mezcla | Valores C |
|-----------------------|-----------|
| Final                 | 2,5       |
| Parcial               | 3         |
| Sustancial            | 4         |

*Fuente:* (Autores, 2018)

*Recomendado luego  $C = 3$*

$$D_{90} \text{ antracita} = 3 * 0,55\text{mm} = 1,65\text{mm}$$

Se recomienda que el coeficiente de conformidad de la antracita sea idéntico al de la arena luego:

$$C\mu \text{ antracita} = C\mu \text{ arena}$$

$$C\mu \text{ antracita} = 1,60\text{mm}$$

$$\text{Tamaño específico antracita} = 0,75\text{mm}$$

**Ecuación 51. Cálculo espesor del lecho filtrante**

$$\frac{T\varepsilon_a}{Y_a} = \frac{T\varepsilon_A}{X_a}$$

$$X_a + X_A = 100\%$$

$$T\varepsilon_a X_A = T\varepsilon_A X_a$$

$$X_A = \frac{T\varepsilon_A X_a}{T\varepsilon_a}$$

$$X_A = \frac{0,75mm}{0,55mm} X_a$$

$$X_A = 1,36 X_a$$

$$X_A + X_a = 0,08m \rightarrow \text{Asumido}$$

$$1,36X_a + X_a = 0,08m$$

$$2,36 X_a = 0,08m$$

$$X_a = \frac{0,08m}{2,36}$$

$$X_a = 0,34m$$

$$X_A = 1,36 * 0,34m$$

$$X_A = 0,46m$$

**Tabla 23. Tabla de valores grava de soporte**

| Posición     | Espesor<br>(cm) | Tamaño<br>(pulgadas) |
|--------------|-----------------|----------------------|
| Fondo        | 12              | 2 - 1                |
| Segunda capa | 7               | 1 - 1/2              |
| Tercera capa | 7               | 1/2 - 1/4            |
| Cuarta capa  | 7               | 1/4 - 1/8            |
| Gravilla     | 7               | 1/8 - 1/12           |
| Total        | 40              |                      |

*Fuente:* (Autores, 2018)

***Ecuación 52. Cálculo estructura de drenaje***

$$1\emptyset \text{ C}/10\text{cm}$$

$$1" = 0,0254\text{m}$$

$$1\emptyset \rightarrow 10\text{cm}$$

$$X \rightarrow 170 \text{ cm}$$

$$X \rightarrow 170 - 10 = 160\text{cm}$$

***Ecuación 53. Cálculo de la pérdida de carga en el lecho***

$$h_o = \frac{f' \gamma_v}{g} * \frac{(1 - \beta_0)^2}{\rho_0} * \frac{36}{C_e^2} * L_0 * \sum_{i=r}^n \frac{X_i}{d_i^2}$$

***Ecuación 54. Cálculo de la pérdida en el agua***

$$d_i = \sqrt{d_1 * d_2} = \sqrt{0,042 * 0,059}$$

Dónde:

$$\gamma = 0,01117\text{cm}^2/\text{s}$$

$V$  = Tasa = Rata filtración

$g$  = Gravedad

$\beta_0$  = Porosidad de la arena = 0,40  $\rightarrow$  Asumida

$C_e$  = Coeficiente de espesicidad = 0,82 arena

$L_o = X_a$  cm (arena)

$L_{o1} = X_A$  cm (antracita)

$f' = Kte = 5$

$$h_o = \frac{5 * 0,01117\text{cm}^2/\text{s}}{981\text{cm}} * \frac{0,23 \text{ cm}}{\text{s}} * \text{s}^2 * \frac{(1 - 0,40)^2}{(0,40)^3} * \frac{36}{(0,82)^2} * 34\text{cm} * 192\text{cm}^2$$

$$h_o = 25,76 \text{ cm} = 0,26\text{m}$$

***Ecuación 55. Cálculo de la pérdida en la antracita***

$$h_{o1} = \frac{5 * 0,01117\text{cm}^2}{981\text{cm}} * \frac{0,23 \text{ cm}}{\text{s}} * \frac{(-0,40)^2}{(0,40)^3} * \frac{36}{(0,75)^2} * 46\text{cm} * 98\text{cm}^2$$

$$h_o = 22,45 \text{ cm} = 0,22\text{m}$$

***Ecuación 56. Cálculo de la pérdida de carga total en el lecho***

$$h_o(\text{lecho}) = h_f \text{arena} + h_f \text{antracita}$$

$$h_o = 0,26\text{m} + 0,22 = 0,48\text{m}$$

***Ecuación 57. Cálculo de la pérdida de carga en la grava de soporte***

$$hG = \frac{VL}{3}$$

Dónde:

$V$  = Velocidad- Tasa

$L_g$  = Ancho o espesor de la capa de grava

$$V = \frac{200\text{m}^3}{\text{m}^2 * d} * \frac{d}{1.440\text{min}}$$

$$V = 0,14 \text{ m/min}$$

$$L_g = 0,40\text{m} \rightarrow \text{Asumido}$$

$$hG = \frac{0,14\text{m}}{\text{min}} * \frac{0,40\text{m}}{\text{s}}$$

$$hG = 0,019\text{m} \approx 0,02\text{m}$$

$$h_o(\text{lecho}) = h_f \text{arena} + h_f \text{antracita}$$

$$h_o = 0,26\text{m} + 0,22 = 0,48\text{m}$$

***Ecuación 58. Cálculo de la pérdida de carga en el falso fondo***

$$h_D = \frac{q^2}{C^2 * A^2 * 2g}$$

Dónde:

$q = Q$  promedio \* filtro

$A$  = Área de cada orificio en la vizcuta

**Ecuación 59. Cálculo del caudal por filtro**

$$q = \frac{Q}{N}$$
$$q = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{5}$$
$$q = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\varnothing \text{ c/orificio} = 1" = 0,0254 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$
$$A = \frac{\pi (0,0254)^2}{4}$$
$$A = 0,001 \text{ m}^2$$
$$C = 0,80 \text{ kte}$$
$$h_D = \frac{\left(\frac{0,004 \text{ m}^3}{\text{s}}\right)^2}{(0,80)^2 * (0,001 \text{ m}^2)^2 * 2 \left(\frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)}$$
$$h_D = 1,27 \text{ m}$$

**Ecuación 60. Cálculo de hf en el rango total inicial durante la filtración**

$$h_{ff} = h_D$$
$$h_{OT} = h_o(\text{lecho}) + h_G + h_{ff}$$
$$h_{OT} = 0,48 \text{ m} + 0,02 + 1,27$$
$$h_{OT} = 1,77$$

- Hidráulica de lavado**

Se determina la  $hf$  durante el lavado y la expansión del lecho

$hf$  durante el lavado

$Db$  debe determinarse la  $hf$  lechos, grava y falso fondo

$hf$  lecho  $\Sigma$  arena y antracita

**Ecuación 61. Cálculo de hf Arena**

$$hL = (\rho_s - 1)(1 - P_o)L_o$$

Dónde:

$\rho_s$  = Densidad arena

$P_o$  = Porosidad arena

$L_o$  = Espesor lecho arena

$$hL = (2,65 - 1)(1 - 0,40) * 0,34m$$

$$hL = 0,34m$$

***Ecuación 62. Cálculo de hf Antracita***

$$hL = (\rho_s - 1)(1 - P_o)L_o$$

$$hL = (1,40 - 1)(1 - 0,40) * 0,46m$$

$$hL = 0,11m$$

$$hf \text{ total} = 0,34m + 0,11m$$

$$hf = 0,45m$$

***Ecuación 63. Cálculo de hf Grava***

$$hLG = \frac{V_a L}{3}$$

Dónde:

$L$  = Espesor lecho grava

$V_a = 0,70 \text{ m/min} \rightarrow$  Asumido

$$hLG = \frac{0,70m/min}{3} * 0,40m$$

$$hLG = 0,090$$

***Ecuación 64. Cálculo de hf falso fondo***

$$h_{ff} = \frac{q^2}{C^2 * A^2 * 2g}$$

$$q = \left( \frac{0,70 * 2,5}{32} \right)^2$$

$$q = 0,055$$

$$h_{ff} = \frac{(0,70m^2 * 2,5m^2/32)^2}{(0,70)^2 * (0,001)^2 * 19,62m} * \frac{1m^2}{(60s)^2}$$

$$h_{ff} = \frac{3,025 \times 10^{-6}}{0,49 * 1 \times 10^{-6} * 19,62}$$

***Ecuación 65 Cálculo de hf durante el lavado***

$$h_o \text{ total lecho} + hf \text{ grava} + h_{ff}$$

$$0,45 + 0,09 + desp = 0,54 \text{ m}$$

***Expansión del lecho***

$\varepsilon_1$  la  $\sum q'$  se produce en la arena y antracita

***Ecuación 66. Cálculo de expansión total***

$$Expo \text{ total} = \frac{\varepsilon_a X_a * \varepsilon_A X_A}{X_a + X_A}$$

$$\varepsilon_t = \frac{(0,10 * 0,34) + (0,48 * 0,46)}{(0,34 + 0,46)} = 0,3$$

### 9.3. Resultados Objetivo 3. Estimar el presupuesto de la optimización del Acueducto Regional Arabia

*Tabla 24. Presupuesto General*

| Rubros                                   | Desembolso nuevo  |                   | Total desembolso nuevo | Desembolso normal |                  | Total desembolso normal | Total proyecto     |
|------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------------------|--------------------|
|                                          | Año 2017          | Año 2018          |                        | Año 2017          | Año 2018         |                         |                    |
| <b>Personal</b>                          |                   |                   |                        | 2'412.240         | 2'412.240        | 4'824.480               | 4'824.480          |
| <b>Equipos - compra</b>                  | 38'153.569        | 34'062.000        | 72'215.569             | 0                 |                  | 0                       | 72'215.569         |
| <b>Equipos propios</b>                   |                   |                   |                        | 0                 | 0                | 0                       | 0                  |
| <b>Materiales</b>                        | 107.000           | 1'918.800         | 2'025.800              | 0                 |                  | 0                       | 2'025.800          |
| <b>Salidas de campo</b>                  | 1'680.000         | 600.000           | 2'280.000              | 0                 |                  | 0                       | 2'280.000          |
| <b>Capacitación personal</b>             | 0                 | 0                 | 0                      | 0                 |                  | 0                       | 0                  |
| <b>Refrigerios - relaciones publicas</b> | 0                 | 0                 | 0                      | 0                 |                  | 0                       | 0                  |
| <b>Servicios técnicos</b>                | 0                 | 1'820.000         | 1'820.000              | 0                 |                  | 0                       | 1'820.000          |
| <b>Software</b>                          | 0                 | 0                 | 0                      | 0                 |                  | 0                       | 0                  |
| <b>Evaluación y seguimiento</b>          | 0                 |                   | 0                      | 0                 |                  | 0                       | 0                  |
| <b>Otros</b>                             | 600.000           | 0                 | 600.000                | 0                 |                  | 0                       | 600.000            |
| <b>Costos directos</b>                   |                   |                   |                        |                   |                  |                         | 83'765.849         |
| <b>Utilidad 7%</b>                       |                   |                   |                        |                   |                  |                         | 5'863.609          |
| <b>Imprevistos 7%</b>                    |                   |                   |                        |                   |                  |                         | 5'863.609          |
| <b>Administración 7%</b>                 |                   |                   |                        |                   |                  |                         | 5'863.609          |
| <b>IVA19% sobre la utilidad</b>          |                   | 0                 |                        |                   |                  |                         | 1'114.086          |
| <b>TOTALES</b>                           | <b>40'540.569</b> | <b>38'400.800</b> | <b>78'941.369</b>      | <b>2'412.240</b>  | <b>2'412.240</b> | <b>4'824.480</b>        | <b>102'470.763</b> |

*Fuente:* (Autores, 2018)



## 10. Análisis y Discusión de resultados

### 10.1. Objetivo 1

#### ***Diagnosticar el estado actual de la capacidad y el funcionamiento del acueducto de la vereda La Magdalena***

Según Araya et al., (2010) en el artículo descrito en el Estado del Arte, concluye con que los acueductos rurales son administrados por juntas directivas con poca formación sobre el manejo de recurso hídrico y su administración. A partir de tal afirmación es preciso mencionar que esto se logró ver claramente en la visita de campo; en primer lugar, no se cuenta con un personal que pueda suplir las funciones que demanda la operación y el mantenimiento del acueducto, toda vez que cuenta con una sola persona que se hace cargo de todo el funcionamiento del acueducto; en segundo lugar, la persona que realiza las funciones del acueducto no recibió ningún tipo de capacitación técnica por lo que se basa en sus conocimientos acerca de plomería para arreglar los inconvenientes que estén relacionados con el acueducto. Se relaciona la situación antes descrita con que al acueducto en general le falta mantenimiento, ya que en la visita de campo se observaron ciertas fallencias como tuberías rotas y ausencia de equipos o de estructuras como la rejilla en la bocatomá, entre otras descritas en los Resultados trabajo de campo (Ver Tabla 17).

Por otro lado, se diagnóstica de manera general, que el acueducto cumple con la mayoría de las partes que según (López, 2003) debería tener para lograr brindar agua de calidad, pero se determina que no cuenta con ningún sistema de potabilización lo que significa que el agua entra de manera cruda a los hogares de los suscriptores lo que puede generar un riesgo para la salud de los mismos. Esto se corroboró con los análisis realizados por el laboratorio Analquim, certificado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), (Ver anexo 1). En donde se observa que existe la presencia de *E. coli* y coliformes totales, según la Resolución 2115 de 2007. Deberían estar en 0 para un agua destinada al consumo humano.

Según los resultados obtenidos en donde se encuentra la presencia de *E. coli* en el agua que es captada y destinada a ser potable, se puede decir que los suscriptores están siendo expuestos a un riesgo alto de contagiar una enfermedad transmitida por el agua siendo que más del 80% de las bacterias descritas en el Manual de Bergey (Bergey's Manual of Systematic Bacteriology) pueden aislarse del agua (Apella y Araujo, 2005). En su mayoría son bacterias entéricas, provenientes del tracto gastrointestinal de animales y humanos, denominadas bacterias fecales, cuya capacidad de sobrevivir y reproducirse en el agua es restringida dado el estrés fisiológico que presenta el medio acuoso (Ríos, Agudelo y Gutiérrez, 2017).

El grupo bacteriano que cumple con las características de potencial bioindicador de calidad del agua, es el de las bacterias coliformes, enterobacterias o enterobacteriaceae, anaerobias facultativas las cuales corresponden al 10% de los microorganismos intestinales humanos y animales, por lo que su presencia en el agua está asociada con la contaminación fecal (Arcos, Ávila, Estupiñán y Gómez, 2005) e indica tratamientos inadecuados o

contaminación posterior, dentro de este grupo incluye los géneros *Escherichia*, *Edwardsiella*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, y *Citrobacter*.

El género de *Escherichia*, encontrado en las aguas tomadas por el acueducto para consumo, incluye cepas patógenas y no patógenas y corresponde al 80% de la microflora intestinal normal, donde generalmente es inofensiva, pero en otras condiciones puede ser perjudicial para la salud. En la actualidad están descritas cepas patógenas para el humano causantes de enfermedades graves, como infecciones de las vías urinarias, bacteriemia y meningitis; además seis cepas enteropatógenas pueden causar diarrea aguda.

Dentro de las cepas más peligrosas y a las que se encuentra expuesta la población es la *E. coli* productora de toxina Shiga se destacan los calambres abdominales y la diarrea, con cuadro de fiebre y vómitos (OMS, 2017). El periodo de incubación varía entre tres y ocho días, con una mediana de tres a cuatro días. La mayoría de los pacientes se recuperan en el término de diez días, pero en un pequeño porcentaje de los casos (especialmente niños pequeños y personas de la tercera edad) la infección puede conducir a una enfermedad potencialmente mortal, como el Síndrome Hemolítico Urémico (SHU). El SHU se caracteriza por una insuficiencia renal aguda, anemia hemolítica y trombocitopenia (deficiencia de plaquetas) (OMS, 2017).

Por otro lado en los resultados que se obtuvieron como recopilación bibliográfica de los análisis realizados por la administración del acueducto en el año 2015 se observó la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* los cuales son parásitos que para el año 1985 se llevaban estudiando hace más de 30 años por la etiología de 73 diarreas por lo que se conoce que los agentes etiológicos más comunes son los virus, principalmente el rotavirus; le siguen las bacterias, entre las que destacan la *Escherichia coli*, *Shigella*, *Salmonella* y *Vibrio cholerae* y en tercer lugar destacan los parásitos dentro de los cuales el *Cryptosporidium* y la *Giardia lamblia* ocupan un importante lugar (Angel, et al., 1985). La vigilancia de la enfermedad diarreica aguda (EDA) llevada a cabo en el Laboratorio Nacional de Referencia del Instituto Nacional de Salud (INS, 2011), ha venido mostrando este comportamiento en Colombia. Por ejemplo, durante el 2003, datos obtenidos de 1.335 muestras mostraron que el 17,5% fueron positivos para los siguientes microorganismos: *rotavirus* (7%), *Giardia duodenalis* (6%), *Cryptosporidium sp.* (3%), *Shigella sp.* (0,8%), y *Salmonella sp.* (0,7%) (Organización Panamericana para la Salud - OPS, 2011).

Las principales formas de transmisión directa de parásitos de las Enfermedades transmitidas por agua (ETA's) son los de la vía fecal-oral y el consumo de agua contaminada, y de forma indirecta, el consumo de alimentos regados con agua sin tratar. Los parásitos *Giardia spp* y *Cryptosporidium spp.*, tienen la característica de permanecer en el ambiente por largos periodos de tiempo y son resistentes a 79 procesos de desinfección química y tratamiento de agua correspondiente a la mayoría. (Nash, 1993). Con relación a la dosis infecciosa que puede causar enfermedad, se encuentran diferentes datos según la fuente consultada: de 1 a 10 quistes de *Giardia spp* y de 1 a 30 Ooquistes de *Cryptosporidium spp.*, pueden provocar síntomas clínicos de la enfermedad en humanos y, por consiguiente, aumentar el riesgo de infección en la población (OPS, 1996).

Para el caso de *Giardia spp.*, este parásito genera una enfermedad llamada Giardiasis. El período de incubación es de 1 - 2 semanas. Los cuadros clínicos oscilan entre el estado de portador asintomático y las enfermedades aguda y crónica. Un gran porcentaje de personas presenta infecciones asintomáticas, con malabsorción intestinal imperceptible, que se resuelven espontáneamente (Uribarren, 2018). Entre las manifestaciones de la enfermedad aguda se encuentran: diarrea acuosa o pastosa, esteatorrea (evacuaciones grasosas, generalmente explosivas y fétidas), dolor epigástrico postprandial, anorexia, distensión abdominal, flatulencia y ocasionalmente, cefalea, febrícula, manifestaciones alérgicas (artralgias, mialgias, urticaria); la enfermedad puede resolverse en unas semanas, aún sin tratamiento, pero la presencia de parasitosis crónica es un hallazgo cada vez más frecuente, actualmente, a nivel mundial, asociada con síndrome de intestino irritable, alergias alimentarias y urticaria (Einarsson, Ma'ayeh y Svärd, 2016), así como con diarrea recurrente, esteatorrea, evidencia bioquímica de mala absorción de grasas, lactosa y otros disacáridos, vitamina A y vitamina B12, disminución de peso, deficiencias en el crecimiento y cognitivas en la población infantil (Certad, Viscogliosi, Chabé y Caccio, 2017), (Bartelt & Platts-Mills., 2016).

Para el caso de *Cryptosporidium* este parásito desarrolla una enfermedad llamada Cryptosporidiasis en ésta, el estado de portador es asintomático. La enfermedad en sujetos inmunocompetentes es autolimitada con duración entre 2 - 14 días, aunque puede prolongarse hasta un mes. Incluye diarrea acuosa, ocasionalmente explosiva y fétida, dolor abdominal, flatulencia, vómito, anorexia, pérdida de peso. En menores de 2 años es más frecuente un cuadro severo, que incluye evacuaciones acuosas, ocasionalmente con moco, sin sangre, con deshidratación y desequilibrio electrolítico. Se ha asociado también a retardo en el crecimiento. La parasitosis en personas con algún tipo de inmunocompromiso, con diarrea de tipo coleriforme, puede representar la pérdida de varios litros (se han mencionado casos extremos con hasta 25 litros/24 h). Es una enfermedad asociada con frecuencia a pacientes con SIDA, quienes pueden presentar diarrea crónica de manera intermitente, con episodios hasta de 30 días y recurrencias.

A manera general, se puede determinar que el agua de la Quebrada La Ruidosa afluente principal para la captación de agua dirigida a la población de manera cruda, presenta varias falencias en cuanto a la presencia de microorganismos que puede ser perjudiciales para la salud independientemente del grupo biológico al que pertenezcan. Los grupos relacionados con las enfermedades de transmisión hídrica pueden ser de origen bacteriano, viral, parasitario y en menor medida, micótico.

De igual manera esto se relaciona con el gran crecimiento agropecuario que ha tenido la zona de influencia de la quebrada ya que la presencia o aumento de bacterias, parásitos, virus y hongos en el agua, surge usualmente como efecto directo o indirecto de cambios ocurridos en el medio ambiente y en la población, tales como la urbanización no controlada, el crecimiento industrial, la pobreza, la ocupación de regiones anteriormente deshabitadas por el humano y la disposición inadecuada de excretas humanas y animales. Los cambios relacionados con las actividades antropogénicas se ven reflejados directamente en el entorno, por consiguiente, en el recurso hídrico. Las principales actividades que favorecen la contaminación del agua son las agropecuarias, tales como la

movilización de animales, cultivos, abonos orgánicos mal procesados y disposición inadecuada de aguas residuales que afectan la calidad microbiológica de las fuentes de agua para el abastecimiento de las poblaciones (Núñez, Fraile y Lizarazu, 2009); en la zona de influencia o de ronda de la quebrada se presentan pequeños cultivos de café, caña de azúcar, plátano, entre otros. Así mismo, se encuentran actividades como ganadería a pequeña escala, producción avícola y porcícola, lo que puede inferir en que la contaminación de la quebrada está siendo influenciada por la producción económica en la zona.

## **10.2. Objetivo 2**

### ***Identificar metodologías aplicables a la optimización del acueducto***

Al desarrollar los cálculos de las estructuras hidráulicas que conforman el acueducto se basó en los libros de López Cualla y de Lauro Horacio Arturo. Se determinó que se tienen que optimizar todas las partes del acueducto ya que en este momento no están dando abasto con la demanda y tampoco están en buenas condiciones de operación y mantenimiento; en primer lugar la optimización de la bocatoma es fundamental teniendo en cuenta que la rejilla no tiene las medidas adecuadas y por lo tanto no se está captando el caudal suficiente para abastecer a la población; en segundo lugar el desarenador no tiene las medidas correctas para su adecuado funcionamiento en la remoción de arenas por lo que el agua suministrada en este momento puede que no esté llegando a los hogares en la calidad esperada; en tercer lugar no se realizó la optimización correspondiente al sistema de conducción ya que la administración del acueducto no brindó los datos topográficos necesarios para el recalcu de la conducción y por lo tanto se necesitaría la contratación de un topógrafo para el estudio y acotaje de la zona; y en cuarto y último lugar se realiza el diseño del sistema de potabilización adecuado para el acueducto ya que en este momento no cuenta con ningún tipo de tratamiento.

A partir de la matriz de evaluación descrita en la Tabla 13 desarrollada en los resultados, se obtuvo que la filtración directa era la mejor metodología de potabilización que se le podía dar al agua de la quebrada La Ruidosa partiendo de los análisis físico químicos, en los cuales las únicas condiciones que no cumplen la normatividad son las representadas en las Tablas 21 y 22; se observa que la quebrada presenta una turbidez que cumple la normatividad en temporada seca como lo demuestran los resultados del análisis realizado por la CAR en el año 2015 (Ver Anexo 2) y en temporada de lluvias aumenta de manera poco significativa ya que de igual manera no está muy alejada de la normatividad. Una de las razones más fuertes es el cumplimiento de parámetros para la aplicación de esta metodología ya que teniendo en cuenta que la turbiedad y el color en el agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales y que estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino (Andya, 2000), entonces, en virtud de lo anterior, según las condiciones del agua cruda de la Quebrada La Ruidosa se comparan los valores admisibles para aplicar la filtración rápida establecidos según el comité de la división de

calidad del agua de la American Water Works Association (AWWA, 1980) y el autor Jorge Arboleda Valencia, para el diseño de sistemas de filtración directa.

Dentro de los parámetros se establecen valores para color, turbidez, algas y hierro como se puede observar en la siguiente tabla:

**Tabla 25. Parámetros físico químicos ideales para la filtración directa**

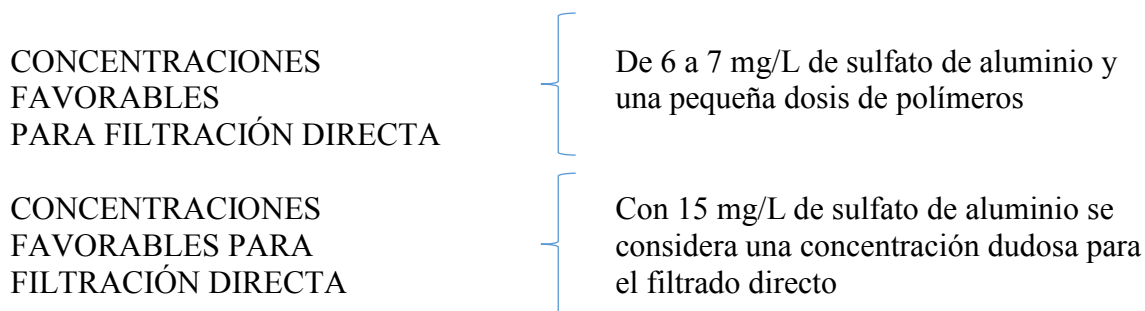
| Parámetro | Unidad                                 |
|-----------|----------------------------------------|
| Color     | 90% del tiempo <10 unidades de color   |
| Turbidez  | 90% del tiempo < 5 UNT                 |
| Algas     | Máxima de 500 y normales de 200 asu/ml |
| Hierro    | 90% < 0,3 mg/L                         |

*Fuente:* Arboleda, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia, McGraw-Hill, 2000. 538

A partir de los valores establecidos por la AWWA se puede decir que el agua de la Quebrada La Ruidosa cumple con 3 de los 4 parámetros ya que la concentración de algas no fue evaluada por lo que se deben tomar precauciones, pero se puede aplicar el método. Es importante tener los resultados de los análisis dentro de los parámetros establecidos en la normatividad vigente ya que al momento de la coagulación se pueden generar alteraciones por la adición del insumo químico, de igual manera la dosis óptima de coagulante se calcula en función del método y, de acuerdo a pruebas realizadas de filtración directa por diferentes autores los rangos máximos de concentración de coagulante empleado según las características del agua son las presentadas en la siguiente ilustración.

### **Ilustración 12. Concentraciones favorables**

➤ Según el comité de la división de calidad de agua de AWWA:



➤ Según parámetros físico químicos ideales para la filtración directa expuestas en la tabla 28 del autor Jorge Arboleda Valencia, se obtienen las siguientes concentraciones de coagulante:

CONCENTRACIONES  
FAVORABLES PARA  
FILTRACIÓN DIRECTA

Se logra realizar filtración directa sin decantación previa con dosis de coagulante entre 4 y 8 mg/L, con o sin adición de polímeros

*Fuente:* (Autores, 2018)

\* Arboleda, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia, McGraw-Hill, 2000. 538

\* Comité de la División de Calidad de Agua de AWWA

Además de estos análisis se evaluó la facilidad en sus procesos unitarios ya que la filtración directa es un proceso relativamente simple y económicamente atractivo. El sistema produce mejorías significativas en la calidad del agua fuente, pero los mejores resultados, se producen en aguas fuente de calidad relativamente alta, con flujos constantes y baja turbidez esto influye sobre todo en los bajos costos de construcción, operación y mantenimiento aunque los mismos restringen su utilidad al presentar varias restricciones para su implementación (Rojas, 2010). Cabe resaltar también que este método de filtración cuenta con tres procesos unitarios principales los cuales son: Coagulación o mezcla rápida, filtración que puede ser lenta o rápida y desinfección.

Por otro lado, se escoge esta metodología ya que según Gestión de Aguas y Residuos (GEDAR, 2002) empresa Andaluza especializada en este tipo de tratamiento, la técnica de la filtración directa es donde los flócs son formados expresamente cuando se sigue el proceso conocido como "micro floculación sobre filtro" (o la misma filtración directa). Los filtros de estas instalaciones generalmente son abiertos, con velocidades de filtración entre 6 y 15 m/h, empleándose los filtros cerrados a presión en instalaciones pequeñas (menores de 50 m<sup>3</sup> /h); esto anteriormente dicho cumple con el diseño de filtros en donde el valor de velocidad máxima es de 12,6 m/h y la instalación es menor a los 50m<sup>3</sup>/h. También los sistemas de filtración directa son similares a los sistemas convencionales, pero omiten la sedimentación. En este proceso incluye la adición de coagulantes, mezcla rápida, floculación y filtración en donde en algunos casos, inclusive el tanque de floculación se omite como lo es ese caso ya que la turbidez del agua es baja y se clasifica como filtración por contacto o coagulación por contacto (Arboleda, J., 2000).

Los procesos de coagulación y filtración en el caso de este método se constituyen como operaciones críticas no solo para la remoción del material coloidal si no para la eliminación de microorganismos sobretodo en la eliminación de Ooquistes de *Cryptosporidium* (Huck et al., 2002) ya que la desinfección en las dosis habituales no es suficiente para eliminar los enteroparásitos y en especial los ooquistes de *Cryptosporidium*; en el proceso de coagulación es posible eliminar quistes y ooquistes entre el 90% y el 95% (Gray, 1996) por esto las etapas previas adquieren especial significado proporcionando la denominada "barrera múltiple" (OPS, 1996) impidiendo que estos microorganismos lleguen al agua de bebida.

Los quistes de *Giardia spp* y los ooquistes de *Cryptosporidium spp*, poseen la característica de permanecer en el ambiente por largos periodos de tiempo bajo condiciones adversas y son resistentes a la mayoría de los procesos de desinfección química y tratamiento convencional de aguas (Hoogenboezem, Ketelaars, Medema, Rijs y Schljven, 2001). El tratamiento convencional de desinfección con cloro por lo general es insuficiente en su concentración para eliminar parásitos y virus, ya que estos microorganismos son resistentes al desinfectante. La eliminación puede ser posible empleando mayores concentraciones de cloro y ajustando el tiempo de contacto necesario según las condiciones de la planta potabilizadora. No obstante, a pesar de obtener mejores resultados, este tipo de práctica no es recomendable ya que se pueden formar compuestos como monocloraminas que pueden generar intoxicaciones y afectar la salud de la población (Corona-Vasquéz, Rennecker, Driedger y Mariñas, 2002). Con relación al proceso de desinfección, el empleo de ozono a una concentración de alrededor de 2 mg/l es capaz de alcanzar una reducción media en la viabilidad de los ooquistes de 95% a 96% con un período de exposición de 10 minutos (Hirata, et al., 2000). Sin embargo, la implementación de dicho sistema en los municipios evaluados requiere altos costos de inversión y mantenimiento.

Siguiendo el margen de que el tratamiento de desinfección no debe estar basado solamente en la aplicación de Cloro, sino que se deberán incluir etapas previas que incluyan Ozonización o Radiación UV se plantea una propuesta de acuerdo con: estudios y revisiones realizadas por compañías dedicadas al desarrollo de este tipo de equipos y haciendo una selección preliminar basados en consumo de energía, facilidad de operación y costos de refacciones, de igual manera teniendo en cuenta que a pesar de que las mayores demandas están asociadas con tecnologías de Ozonización, es la tecnología de Radiación UV hasta un 60% más económica de implantar y operar (Acosta y Peña, 2017). Por esto se opta por implementar una lámpara típica de arco de mercurio para realizar la inactivación de los microorganismos por la luz UV como “desinfección inicial” y obteniendo como resultado del daño fotoquímico a sus ácidos nucleicos y su imposibilidad de duplicar su DNA y RNA (Acosta y Peña, 2017). Por otro lado, la “desinfección final” se realiza a partir de la desinfección convencional con Hipoclorito de Sodio y la dosificación de la solución de desinfección se realizará aprovechando por medio de un esquema de succión tipo vénturi finalizando el diseño de la potabilización.

### **10.3. Objetivo 3**

#### ***Estimar el presupuesto de la optimización del Acueducto Regional Arabia***

A partir del presupuesto realizado en los resultados se puede observar que las variaciones de costos en el dependen directamente de la empresa donde se coticen y de los materiales de construcción debido a la importación de productos y/o la oferta y la demanda, todos los costos puestos a disposición se realizaron con la metodología de cotización telefónica. Por otro lado, se presenta un desglose de lo referente a nuevos equipos, materiales, salidas de

campo y servicios técnicos siendo estos los que mayor variación tienen al momento de la investigación.

**Tabla 26. Especificaciones de los productos de compra**

| <b>Equipos</b>            | <b>Empresa</b>                                             | <b>Especificaciones</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Precio</b> |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Equipo de coagulación     | Pipeline Gauge Services Engineering Asesor Juan Diego Ruiz | 0,75" (MNPT inlet/outlet conections Barbed/MNPT threaded suction port cap) dispositivo de dosificación y mezcla referencia: 584black PVDF.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 7'000.000     |
| Equipo de cloración       | CODIAGUAS                                                  | Unidad de cloración Venturi de ¾", válvula universal radial de ½", válvula universal de ¾", tubería PVC, Uniones PVC.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1'265.362     |
| Equipo de desinfección UV | VIQUA                                                      | Unidad UV 80 GPM 660001-R(K), mano de obra montaje, transporte, otros.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 24'002.964    |
| Tren de filtración        | CODIAGUAS                                                  | Tanque estructural en PRFV, Distribuidor interno para tanque de 18", Colector interno para tanque de 18", Válvula manual de tres vías N56D, Relleno en gravilla 1/4", Arena sílice No 16, Válvula de corte universal, Unión Universal PVC, Unión PVC presión, Unión PVC presión RDE 21, Tubería PVC presión RDE 21-1, Bushing PVC presión, Acople macho PVC presión, Soporte para tubería tipo ménsula con abrazadera, Manómetro 0-100 PSI con glicerina carátula de 2, Collar de derivación, racor, codo PVC presión, Limpiador PVC, Pegante PVC, Traslado de unidades, Mano de obra montaje. | 12'885.243    |
| Tanque de almacenamiento  | Rotoplast Asesora Pilar Cardona                            | Tanque cilíndrico horizontal 30000 L 2.4 negro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 27'062.000    |

*Fuente:* (Autores, 2018)

## 11. Conclusiones

- El agua de la quebrada La Ruidosa no cumple con las especificaciones de microorganismos igual a cero, por lo tanto, presenta un riesgo alto de infectividad en la población por parte de microorganismos que pueden generar complicaciones graves e incluso la muerte como



lo son *E. coli*, *Cryptosporidium* y *Giardia*, que de manera general indican contaminación por materia fecal lo que lleva a pensar en generar una mejor gestión sobre el recurso agua por parte de la administración para evitar esta contaminación en la fuente.

- La falta de un sistema de potabilización y las fallencias en el diseño del acueducto hace entender que realmente éste no está funcionando de la manera adecuada, por lo tanto, con este proyecto se brinda a la comunidad un mejor sistema de abastecimiento de agua potable que cumpla con la normatividad y que sea eficiente con el fin de mejorar la calidad de vida de los usuarios del acueducto Regional Arabia.
- Con la optimización del acueducto es posible que la tarifa de prestación del servicio aumente en su costo ya que el presupuesto tiene costos elevados, pero se debe tener en cuenta que este no puede influir en la calidad de vida de la comunidad ya que están pagando por un servicio vital y de calidad ya que se eliminaría el riesgo de presentar enfermedades de origen hídrico.

## **12. Recomendaciones**

- Teniendo en cuenta que es un proyecto de características hidráulicas, ambientales y sanitarias se recomienda que se complemente con estudios topográficos no solo para la conducción si no para la realización del replanteamiento de las estructuras hidráulicas diseñadas ya que es necesario realizar el cálculo estructural y de geotecnia para su óptima instalación en campo.
- Es importante que se empleen mecanismos de protección y gestión de la cuenca hidrográfica del Calandaima con el fin de mantener el caudal de diseño a futuro y de conservar las buenas características físico químicas que presenta evitando la contaminación por materia fecal ya existente, además establecer una supervisión continúa a las estructuras del sistema con el fin de revisar en ellas los aspectos técnicos para evitar problemas en el abastecimiento.

### 13. Bibliografía

- Acosta, E. y Peña, P. (2017). *“Diseño conceptual y básico de una planta de potabilización para agua superficial en las veredas Arabia y otras del municipio de Viotá”*. CODIAGUAS Ltda.
- Alcaldía de Viotá. (2012). *“Plan de Desarrollo Municipal 2012 – 2015”* Departamento de Planeación de Viotá. Cundinamarca, Colombia
- Alcaldía de Viotá. (2012). *“Plan de Desarrollo Municipal 2016 – 2019”*. Departamento de Planeación de Viotá, Cundinamarca
- American Water Works Association. (1980). Comité de la división de calidad del agua
- Andya, Y. (2000). *“Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación”*. SEDAPAL. 1-44
- Angel, V., Franco, L., Jaramillo, J., Medina, L., Ochoa, L. y Vélez, A. (1985). *“Cryptosporidiosis en Medellín; prevalencia de Cryptosporidium en muestras fecales diarreicas en seis laboratorios de Medellín”*. Rev. Biomédica. Vol. 5. 53-61. Medellín, Colombia
- Apella, M., Araujo, P. (2005). *“Microbiología de agua: conceptos básicos”*. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del Buenos Aires. Recuperado de: [http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafeware/documents/libro/02\\_Capitulo\\_02.pdf](http://www.psa.es/webesp/projects/solarsafeware/documents/libro/02_Capitulo_02.pdf)
- Araya, F.; Carvajal, V.; Carvajal, J.; Navarro, A.; Estrada, M.; Herrera, J.; Moreira, C.; Pérez, D. (2010). *“Análisis de la gestión ambiental en los acueductos rurales de la Zona Norte de Costa Rica”*. Tecnología en marcha, Vol. 23, No. 4, 74-85
- Arboleda, J. *“Teoría y práctica de la purificación del agua”*. Colombia, McGraw-Hill, 2000. 538
- Arcos, M., Ávila, S., Estupiñán, S. y Gómez, A. (2005). *“Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua”*. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia
- Arturo, L. (1990). *“Diseño básico de acueductos y alcantarillados”*. Universidad EAFIT. Bogotá, Colombia

- Bartelt, L. y Platts-Mills, J. (2016). "*Giardia: A Pathogen or commensal for children in haigh-prevalence settings?*". Vol. 5
- Burchard, L. (2005). "*Plantas de tratamiento de agua potable*". Antofagasta, Chile
- Cadavid, N. (2009). "*Acueductos comunitarios: patrimonio social y ambiental del Valle de Aburrá*". Facultad de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia
- Certad, G., Viscogliosi, E., Chabé, M. y Caccio, S. (2017). "*Pathogenic Mechanisms of Cryptosporidium and Giardia. Trends parasitol*". Vol. 7. 561-576
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (s.f). "*Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento evaluación rápida de plantas potabilizadoras*". México
- Corona-Vasquéz, B., Rennecker, L., Driedger, M. y Mariñas, J. (2002). "*Secuential inactivation of Cryptosporidium parvum oocysts with chlorine dioxide followed by free chlorine or monochloramine water*". Vol. 36. 88-178
- Einarsson, E., Ma'ayeh, S. y Svärd, S. (2016). "*An up-date on giardia and Giardiasis. Current opinion in microbiology*" Vol. 34. 47-52
- Empresa de Servicios Públicos de Viotá (ESPV). (2014). "*Plan de gestión integral de residuos sólidos*" Viotá, Cundinamarca
- Financiera de Desarrollo Territorial (FINDETER). (2017). "*Informe sectorial: agua potable y saneamiento básico*". Colombia
- Fondo Internacional de Emergencia de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2007). "*La meta de los ODM relativa al agua potable y el saneamiento: el reto del decenio para zonas urbanas y rurales*"
- Gestión de Aguas y Residuos. (GEDAR). (2002). "*Filtración*". Chauchina. Granada, España
- Gómez, C. (2007). "*Constituyentes del agua*". Bogotá, Colombia

- Gray, N. (1996). “*Calidad del agua potable. Problemas y soluciones*”. Zaragoza, España. 49-258
- Hernández, S., Fernández, C., Baptista, L. (2014). “*Metodología de la investigación*”. Mc Graw Hill / Interamericana Editores, México D.F.
- Hirata, T., Chikuma, D., Shimura, A., Hashimoto, A., Motoyama, N. y Takahashi, K. (2000). “*Effects of ozonation and chlorination on diability and infectivity of Cryptosporidium parvum oocysts*”. Water sci technol. Vol. 41. 39-46
- Hoogenboezem, W., Ketelaars, H., Medema, G., Rijs, G. y Schljven, J. (2001). “*Cryptosporidium and Giardias: Ocurrence in sewage, manure and surface water*”. Holanda. 5-24
- Huck, P., Coffey, B., Emelko, M., Maurizio, D., Slawson, R., Anderson, W. y Melia, C. (2002). “*Effects of filter operation on Cryptosporidium removal*”. AWWA. Vol. 94. 97-111
- Instituto Nacional de Salud (INS). (2011). “*Estado de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia 2007-2011*”. Bogotá, Colombia
- López, R. (2003). “*Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*”. Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2007). *Decreto 1575 de 2007*. Colombia
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2007). *Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007*. Colombia
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2018). “*Gestión integral del recurso hídrico*”. Colombia
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT). (2017). *Resolución 0330 del 8 de Junio de 2008. “Reglamento Técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (RAS)”*. Colombia
- Nash, L. (1993). “*Water Quality and health. Water in crisis: A Guide to the worlds fresh water resource*”. Oxford University Press. New York. USA

- Navarro, A.; Araya, F.; Pérez, D.; Moreira, C.; Estrada, M. (2013). “*Vulnerabilidad de los sistemas de acueductos rurales: cómo identificarla*”. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Tecnología en marcha, Vol. 26, No. 3, 63-74
- Núñez, N., Fraile, I. y Lizarazu, J. (2009). “*Microorganismos patógenos del agua. Estudio de Molinao Erraka*”. Vol. 13. 69-76
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). “*Programa: agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud*”
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). “*E. Coli*”. Centro de prensa. Notas descriptivas. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs125/es/>
- Organización Panamericana para la Salud (OPS). (1996). “*La calidad del agua potable en América Latina. Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química*”. Washington, D.C., USA. ILSI Press. 25-232
- Organización Panamericana para la Salud (OPS). (2011). “*Indicadores básicos 2011: Situación de salud en Colombia*”. Washington, D.C., USA
- Ríos, S., Agudelo, R. y Gutiérrez, L. (2017). “*Patógenos microbianos e indicadores microbiológicos de la calidad del agua para consumo humano*”. Rev. Facultad Nacional de Salud Pública. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia
- Rojas, E. (2010). “*Viabilidad de la filtración directa de agua dulce para hangares flotantes*” (tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, Colombia
- Salazar, B. (2011). “*Prestación comunitaria del servicio del agua*”. Proyecto mensajeros del agua. Fondation Danielle Mitterrand. Medellín, Colombia
- Tamayo, R., Galvis, A., Barrera, L., García, C. y Ortiz, N. (2014). “*Estudio y diseño del acueducto que atiende las veredas San Antonio, Santa Ana, El Parral, Chontaduro y La Pita*”. Universidad El Bosque. Bogotá, Colombia
- Toledo, A. (s.f). “*La gestión integrada de recursos hídricos: un reto para el Perú*”. Autoridad Nacional del agua. Perú

- Uribarren, T. (2018). "*Cryptosporidiasis*". Departamento de Microbiología y Parasitología. Facultad de Medicina. UNAM
- Vargas, L. (2004). "*Procesos unitarios y plantas de tratamiento*". Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS)
- Varón, L. (2014). *Uso de las plantas de tratamiento de agua potable en acueductos rurales* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
- Villada, M. (2012). "*Estudios de caso sobre la gestión y gobernanza del agua rural como un bien común*". Corporación Ecológica y Cultural Penca de Sábila. Colombia