

# Gestión integral de los recursos hídricos en abastecimiento y calidad del agua



COLECCIÓN: SOSTENIBILIDAD

**JESÚS ERNESTO  
TORRES QUINTERO**

*Homenaje póstumo*

1956 - 2021



**UNIVERSIDAD  
LIBRE®**

Facultad de Ingeniería  
Centro de Investigación  
Facultad de Ingeniería (CIFI)

1

**JESÚS ERNESTO  
TORRES QUINTERO  
1956 - 2021**

Ingeniero Civil con más de 40 años de ejercicio profesional, con grado de Magíster en Recursos Hidráulicos y tres especialización en su área de conocimiento: en Recursos Hidráulicos con énfasis en Hidrología de la Universidad Nacional; en Hidrología General y Aplicada, y en Hidrología Isotópica del Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas (España). Realizó cursos de Pedagogía en la Universidad Libre y de Modelos Matemáticos y Sedimentología en el Centro de Desarrollo de la Tecnología Nuclear (Brasil).

Su trayectoria de 35 años de experiencia docente la desarrolló en las universidades Nacional, Javeriana, Católica, Libre y Central, desempeñándose además como Investigador Docente de la Universidad Libre, en el grupo de investigación *Tecnoambiental*.

Su producción académica e investigativa se extendió a cuatro libros y diversos artículos científicos, publicados en las más reconocidas plataformas de difusión.

# Gestión integral de los recursos hídricos en abastecimiento y calidad del agua

**JESÚS ERNESTO TORRES QUINTERO**  
*Homenaje póstumo (1956-2021)*



*Cristina Alejandra Herrera Quevedo*

*María Camila Poveda Orjuela*

*José Nicolás Ortiz Rubiano*

*Natalia Andrea Hernández Núñez*

*Vanessa Ahudrey Joya Flórez*

*Paula Alejandra Pérez Gómez*

*Dania Xileth Gutiérrez Valderrama*

*Laura Vanessa Lotero Zapata*

*Liseth Vanesa Angarita García*

*Karen Tatiana Quiroga Camargo*

COLECCIÓN: SOSTENIBILIDAD



**UNIVERSIDAD  
LIBRE®**  
Facultad de Ingeniería  
Centro de Investigación  
Facultad de Ingeniería (CIFI)

1

Gestión integral de los recursos hídricos en abastecimiento y calidad del agua / Jesús Ernesto Torres Quintero ... [et al.] – Bogotá : Universidad Libre, 2022

231 p. ; il., gr. (Colección Sostenibilidad : 1)  
Incluye referencias bibliográficas  
ISBN 978-958-5578-90-6 (digital)

1. Recursos hídricos -- Colombia 2. Acueductos -- Colombia 3. Abastecimiento de agua -- Colombia

I. Torres Quintero, José Ernesto, 1956 - 2021

628.1 SCDD 21

Catalogación en la Fuente – Universidad Libre. Biblioteca

### *Comentarios y sugerencias*

© Facultad de Ingeniería, 2022.

© Universidad Libre, sede principal, 2022.

ISBN DIGITAL: 978-958-5578-90-6

Queda hecho el depósito que ordena la Ley.

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra ni su incorporación a un sistema informático ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

*Editor académico:* José Nicolás Ortiz Rubiano

*Correo:* [nicolasortizr08@gmail.com](mailto:nicolasortizr08@gmail.com)

*Coordinación de edición:* Comité Editorial Facultad de Ingeniería

*Correo:* [comiteeditorial.ing.bog@unilibre.edu.co](mailto:comiteeditorial.ing.bog@unilibre.edu.co)

*Corrección de estilo:*

*Correo:*

*Fotografías portada y capítulos:* <https://www.pexels.com> - Eberhard Grossgasteiger - Kris Lucas - Andreas Fingerle - Andy Kuzma - Felix Mittermeier - Marta Wave

*Editorial:* Universidad Libre

*Coordinación de Publicaciones y Comunicaciones*

*Correo:* [comunicaciones@unilibre.edu.co](mailto:comunicaciones@unilibre.edu.co)

Calle 8 n.º 5-80, tel. 3821000, Bogotá, D. C.

*Diseño y diagramación:* Diana Guayara V. - [eykon.graffein@gmail.com](mailto:eykon.graffein@gmail.com)

Esta obra está cofinanciada por el Fondo de Publicaciones de la Universidad Libre.

Elaborado en Colombia en los talleres gráficos  
de AF&M Producción Gráfica S.A.S.

Carrera 68 G n.º 64A - 31

tel. +57(1) 250 1584

[afmproducciongrafica@gmail.com](mailto:afmproducciongrafica@gmail.com)

Bogotá, D. C., Colombia, 2022

Produced in Colombia



**UNIVERSIDAD LIBRE®**  
Vigilada Mineducación

## Directivas

JORGE ALARCÓN NIÑO  
*Presidente Nacional*

JORGE GAVIRIA LIÉVANO  
*Vicepresidente*

FERNANDO ENRIQUE DEJANÓN RODRÍGUEZ  
*Rector Nacional*

FLORO HERMES GÓMEZ PINEDA  
*Secretario General*

RICARDO ZOPÓ MÉNDEZ  
*Censor Nacional*

ELIZABETH VILLAREAL CORRECHA  
*Directora Nacional de Investigaciones*

ELIZABETH GARCÍA GONZÁLEZ  
*Presidenta Sede Principal*

ARTURO SALINAS SUÁREZ  
*Rector Sede Principal*

MÓNICA PATRICIA FORTICH NAVARRO  
*Directora Seccional de Investigaciones*

JOHN ALBEYRO PEÑA CARREÑO  
*Decano Facultad de Ingeniería*

HÉCTOR FERNANDO ROJAS MOLANO  
*Director Centro de Investigación  
Facultad de Ingeniería (CIFI)*

MAURICIO ALONSO MONCADA  
*Director Programa de Ingeniería de Sistemas*

FREDY ALEXANDER AGUIRRE GÓMEZ  
*Director Programa de Ingeniería Mecánica*

GINA PAOLA GONZÁLEZ ANGARITA  
*Directora Programa de Ingeniería Ambiental*

ANDRÉS GIOVANNI GUARÍN PALOMINO  
*Director Programa de Ingeniería Industrial*

FERNANDO PÉREZ PALOMINO  
*Director Núcleo Común*

FABIÁN BLANCO GARRIDO  
*Director Instituto de Posgrados*



## A SU OBRA PÓSTUMA

*¿Quién cerró con diques la mar cuando, impetuosa se salía de madre?*  
(Miguel de Unamuno)

Fue un buscador de los secretos del agua. Tuve la oportunidad de acompañarlo por un terreno escarpado y entre densa maraña, buscando la boca-toma del acueducto Aguas de occidente, en el río Guane (Sasaima). Su ojo avizor lo guiaba, mientras su mente llevaba interna la pesquisa del investigador nato que exploró sin fatiga la rudeza de las cuencas y las bravas corrientes o sus pausas apacibles, donde el agua se encausa a pasar por acueductos de pueblos y ruralidades.

El Ingeniero Ernesto Torres Quintero, en todo momento tranquilo, partió sin que el tiempo ni sus galernas hayan dejado arruga en su frente esbelta, cargada de proyectos y de una vasta experiencia profesional en las áreas de hidráulica, energías alternativas, acueductos y alcantarillados, plantas de potabilización de aguas, plantas de tratamientos de agua residual, riesgos ambientales, construcción y vías.

Su vida académica fue pródiga y desde los claustros universitarios enseñó y dio línea a sus estudiantes sobre el valor de la ciencia y la investigación. Buscando la verdad, lo hizo con independencia y con un heroico furor llevado a su modo de obrar; así se le veía, discreto, poderoso, fecundo, sutil, docto, ingenioso y hábil, siendo estas honduras, su esencia y la raíz de su continuidad.

Es de fuerza reconocer que Ernesto Torres, en la academia y en su vida, sirvió sus ideales con desinterés cenobítico y sin ninguna sospecha de su probidad. Fue en la universidad un sembrador, cargado de semillas y de semilleristas, a quienes condujo mostrándoles los caminos del conocimiento, tal cual lo refleja esta obra que se presenta y que a su vez le indilga como un hombre entero y verdadero. No obstante, Maurois, ese hombre explorador de existencias, nos recuerda, que por más que conozcamos a alguien, sus apellidos, sus rasgos y obras, nunca alcanzaremos a medir la superficie de un hombre.

RODRIGO VELÁSQUEZ GIRALDO  
*Docente-investigador Facultad de Ingeniería*





# CONTENIDO



Glosario	17
Introducción	23
<b>Capítulo 1.</b> <i>Evaluación de la calidad hídrica como herramienta de gestión integral del recurso hídrico en el río Teusacá</i>	27
1.1 Introducción	28
1.2 Consideraciones teóricas y metodológicas	30
1.3 Cálculo del ICA	31
1.4 Cálculo del IRCA	32
1.5 Comparación del conflicto de uso del suelo con la zonificación ambiental establecida	34
1.6 Marco geográfico y legal	35
1.7 Observaciones y encuentros	38
1.8 Consideraciones finales	46
<b>Capítulo 2.</b> <i>Evaluación hidráulica e hidrológica de las bocatomas de La Vega, Girardot, Ubaque, Choachí y Sasaima</i>	49
2.1 Introducción	50
2.2 Consideraciones teóricas y metodológicas	51
2.3 Marco legal	56
2.4 Observaciones y encuentros	57
2.5 Conclusiones	67



<b>Capítulo 3.</b>	<i>Análisis hidrológico y optimización de las bocatomas del acueducto rural de Sasaima, Cundinamarca a partir de la producción más limpia</i>	69
3.1	Introducción	70
3.2	Marco geográfico y marco legal	72
3.3	Estudio hidrológico de las fuentes de abastecimiento	78
3.4	Calidad de agua de las fuentes de abastecimiento	99
3.5	Diseño, evaluación y propuestas de alternativas de optimización de las bocatomas a partir de la producción más limpia	104
3.6	Consideraciones finales	114
<b>Capítulo 4.</b>	<i>Evaluación de la red de acueducto y abastecimiento del municipio de Choachí Cundinamarca desde la captación hasta la planta de potabilización</i>	117
4.1	Introducción	118
4.2	Metodología	119
4.3	Conclusiones	130
<b>Capítulo 5.</b>	<i>Alternativas de diseño para la optimización del sistema de acueducto Veredal Tunjaque (La Calera, Cundinamarca)</i>	131
5.1	Introducción	132
5.2	Marco geográfico y legal	133
5.3	Estimación de la oferta	135
5.4	Estimación de la demanda de agua	143
5.5	Funcionamiento planta de tratamiento	148
5.6	Consideraciones finales	187
<b>Capítulo 6.</b>	<i>Modelación hidráulica para sistemas de distribución de agua potable y estudios de caso: red de suministro potable y contraincendio en urbanización y acueducto municipal de Choachí, Cundinamarca</i>	189
6.1	Funcionamiento general del software	191
6.2	Desafíos en la práctica profesional	192
6.3	Estudios de caso: red de suministro potable y contraincendio en apartamentos municipio de villeta	196
6.4	Estudios de caso: Red Acueducto Municipal de Choachí-Cundinamarca	201
<b>Anexos Capítulo 2</b>		207
<b>Referencias bibliográficas</b>		213

## ÍNDICE DE FIGURAS



Figura 1.	Localización puntos de muestreo	31
Figura 2.	Ubicación geográfica del río Teusacá	36
Figura 3.	Aforo del Río Teusacá en el punto 1	38
Figura 4.	Aforo del Río Teusacá en el punto 2	38
Figura 5.	Comparación ICA estaciones Puente La Cabaña y Humedal Aposentos en el mismo periodo de tiempo	41
Figura 6.	Variación de oxígeno disuelto en las estaciones evaluadas.	42
Figura 7.	Resultados de IRCA de las empresas prestadoras de servicios públicos	43
Figura 8.	Conflictos de uso de suelo dentro de la subcuenca	45
Figura 9.	Zonificación ambiental dentro de la subcuenca	45
Figura 10.	Bocatoma de Ubaque	53
Figura 11.	Bocatoma de Sasaima	54
Figura 12.	Bocatoma de Girardot	55
Figura 13.	Ubicación general del área de estudio	74
Figura 14.	Ubicación de área de estudio a nivel local	75
Figura 15.	Ubicación de las fuentes hidrológicas que abastecen el acueducto	76
Figura 16.	Levantamiento de datos en la zona de estudio	79
Figura 17.	Caracterización de los patrones de drenajes de los patrones de drenajes	80
Figura 18.	Esquema de separación del hidrograma	86
Figura 19.	Plano topográfico del área de estudio	90



Figura 20. Porcentaje de área entre las curvas de nivel para la curva hipsométrica	91
Figura 21. Curva hipsométrica de las quebradas de estudio	92
Figura 22. Perfil de quebradas Blanca y Pauda	92
Figura 23. Perfil de quebradas en el software de ArcGis	93
Figura 24. Porcentaje de pendientes clasificadas por el IDEAM	94
Figura 25. Precipitaciones medias de la zona de estudio	95
Figura 26. Curva de intensidad, duración y frecuencia para el año 2018	96
Figura 27. Diagrama de la curva de duración de caudales	96
Figura 28. Hidrogramas de las quebradas	98
Figura 29. Diagrama de barras del balance hídrico	99
Figura 30. Bocatoma lateral Quebrada Pauda	110
Figura 31. Ubicación de la bocatoma de fondo removida	111
Figura 32. Bocatoma de fondo quebrada Blanca	113
Figura 33. Aforo en la quebrada Potrero Grande	120
Figura 34. Secciones del aforo	120
Figura 35. Pendientes	123
Figura 36. Método logarítmico	127
Figura 37. Método exponencial	128
Figura 38. Método lineal	128
Figura 39. Método potencial	129
Figura 40. Sitio de Estudio, Vereda Tunjaque - La Calera, Cundinamarca	134
Figura 41. Cuenca Q. Chinzaco - La Calera Cundinamarca	137
Figura 42. Pendiente Q. Chinzaco - La Calera Cundinamarca	138
Figura 43. Estimación de isoyetas Q. Chinzaco - La Calera Cundinamarca	140
Figura 44. Curva Duración de Caudales PTE La Calera	141
Figura 45. Curva Duración de Caudales Q. Chinzac	141
Figura 46. Curva de Caudales Máximos Chinzaco	142
Figura 47. Proyección Poblacional Tunjaque	145
Figura 48. Proyección del consumo Tunjaque	146
Figura 49. Frecuencia del servicio brindado según los usuarios del acueducto con su respectivo resumen estadístico	147
Figura 50. Calidad de agua según los usuarios del sistema de acueducto con su respectivo resumen estadístico	148
Figura 51. Sistema de filtración actual del acueducto Tunjaque	149
Figura 52. Análisis de parámetros de agua in situ y en laboratorio de la Universidad Libre	150
Figura 53. Conexión clandestina en la salida de los filtro	152
Figura 54. Presencia de pérdidas de agua en el desarenador actual de Tunjaque	152
Figura 55. Bocatoma actual del acueducto Tunjaque	153
Figura 56. Aforo en la Bocatoma del acueducto Tunjaque	154



Figura 57. Desarenador actual del acueducto Tunjaque	155
Figura 58. Vista planta del desarenador	161
Figura 59. Vista longitudinal del desarenador	162
Figura 60. Vista transversal Del desarenado	162
Figura 61. Prueba de jarras	163
Figura 62. Turbiedad obtenida de la prueba de jarras	164
Figura 63. pH Obtenido de la prueba de jarras	164
Figura 64. Vista longitudinal de la Canaleta Parshall	168
Figura 65. Vista en planta de la Canaleta Parshall	168
Figura 66. Vista en planta del floculador de flujo horizontal	171
Figura 67. Vista longitudinal del floculador hidráulico de flujo horizontal	171
Figura 68. Vista longitudinal del sedimentador de alta tasa	174
Figura 69. Vista en planta del sedimentador de alta tasa	174
Figura 70. Vista transversal del sedimentador de alta tasa	175
Figura 71. Zona de lodos del sedimentador de alta tasa	175
Figura 72. Vista transversal del filtro rápido mixto y su tanque de lavado	183
Figura 73. Vista en planta del filtro rápido mixto	183
Figura 74. Vista en planta del tanque de contacto	186
Figura 75. Vista transversal del tanque de contacto	186
Figura 76. Red acueducto Choachí AutoCAD/EPACAD	193
Figura 77. Red acueducto conjunto residencial AutoCAD/EPACAD	194
Figura 78. Visualización de errores que afectan EPACAD	194
Figura 79. Desconexión de nodos convertido por EPACAD	195
Figura 80. Vista en plata torres de apartamentos	196
Figura 81. Curva de la bomba software EPANET	197
Figura 82. Horsepowers de la bomba software EPANET	197
Figura 83. Suministro red contraincendios y agua potable	198
Figura 84. Resultados red contraincendios - última torre	199
Figura 85. Resultados red contraincendios - última torre visualización válvula	199
Figura 86. Resultados red contraincendios - Salón comunal	200
Figura 87. Resultados red contraincendios - Salón comunal visualización válvula	200
Figura 88. Resultados red potable - Salón comunal visualización válvula	201
Figura 89. Red acueducto municipal Choachí	202
Figura 90. Curva de modulación de demanda	203
Figura 91. Red estática 2015	203
Figura 92. Red dinámica 2015	204
Figura 93. Red estática 2040	205
Figura 94. Red dinámica 2040	206
Figura 95. Mapa de la cuenca del río Ilá	207
Figura 96. Mapa de la cuenca del río Magdalena	208
Figura 97. Mapa de la cuenca del río Palmar	208



Figura 98. Mapa de la cuenca del río Guane	209
Figura 99. Mapa de la cuenca del río Guane	209
Figura 100. Rejill	210
Figura 101. Diseño de la presa	210
Figura 102. Aducción de la bocatoma	211
Figura 103. Bocatoma de Girardot	211

## ÍNDICE DE TABLAS



Tabla 1.	Clasificación ICA	32
Tabla 2.	Parámetros evaluados para el IRCA	33
Tabla 3.	Clasificación del IRCA	34
Tabla 4.	Valores por muestra de las cinco variables que determinan el ICA en el periodo 2010-2019 por estación	39
Tabla 5.	Resultados ICA por estación	41
Tabla 6.	Normativa aplicable	56
Tabla 7.	Dimensiones de la cuenca del río Ilá	57
Tabla 8.	Demanda poblacional municipio de La Vega	57
Tabla 9.	Proyección de consumo municipio de La Vega	58
Tabla 10.	Dimensiones de la cuenca del río Magdalena	59
Tabla 11.	Demanda poblacional municipio de Girardot	59
Tabla 12.	Proyección de consumo municipio de Girardot	60
Tabla 13.	Dimensiones de la cuenca del río Palmar	61
Tabla 14.	Demanda poblacional municipio de Ubaque	61
Tabla 15.	Proyección de consumo municipio de Ubaque	62
Tabla 16.	Dimensiones de la cuenca de la Quebrado Potrero Grande	63
Tabla 17.	Demanda poblacional municipio de Choachí	63
Tabla 18.	Proyección de consumo municipio de Choachí	64
Tabla 19.	Dimensiones de la cuenca del río Guane	65
Tabla 20.	Demanda poblacional municipio de Sasaima	65



Tabla 21.	Proyección de consumo municipio de Sasaima	66
Tabla 22.	Dimensiones bocatoma de Sasaima	67
Tabla 23.	Valores interpretativos de la densidad de drenaj	81
Tabla 24.	Valores interpretativos del factor de forma	82
Tabla 25.	Clases de pendientes según el IGAC	83
Tabla 26.	Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad, duración, frecuencia, IDF, para Colombia	85
Tabla 27.	Características morfométricas de las cuencas	90
Tabla 28.	Proceso para la elaboración del balance hídrico	97
Tabla 29.	Ecuación del balance hídrico para la zona de estudio	98
Tabla 30.	Procedimiento para la obtención de los subíndices de calidad	100
Tabla 31.	Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA	102
Tabla 32.	Ubicación de los puntos de muestreo	103
Tabla 33.	Valores de los parámetros determinados en los puntos de muestreo para el cálculo del ICA	103
Tabla 34.	Índice de calidad de agua	103
Tabla 35.	Metodología para el diseño de bocatoma lateral	104
Tabla 36.	Metodología para el diseño de la bocatoma de fondo	106
Tabla 37.	Resultado análisis hidrológico para diseño de bocatoma	109
Tabla 38.	Diseño de bocatoma lateral quebrada Pauda	109
Tabla 39.	Comparación bocatoma lateral	110
Tabla 40.	Diseño de bocatoma de fondo quebrada Blanca	112
Tabla 41.	Área del Aforo	121
Tabla 42.	Forma de la cuenca	124
Tabla 43.	Población	126
Tabla 44.	Métodos para la determinación del crecimiento poblacional	126
Tabla 45.	Método de sensibilidad	127
Tabla 46.	Método logarítmico	127
Tabla 47.	Población de diseño	129
Tabla 48.	Incremento poblacional	129
Tabla 49.	Proyección de caudal de diseño	130
Tabla 50.	Características físicas Q. Chinzac	137
Tabla 51.	Precipitación Anual Estaciones Torca, Sta Teresa y Edificio CAR	139
Tabla 52.	Estimación área de Isoyetas	139
Tabla 53.	Datos curva duración de caudales	140
Tabla 54.	Caudales Medios Q. Chinzaco	142
Tabla 55.	Caudales Máximos Q. Chinzaco	143
Tabla 56.	Métodos de proyección poblacional	143
Tabla 57.	Tamaño de muestra encuesta a usuarios	146
Tabla 58.	Preguntas para encuesta a usuarios	147
Tabla 59.	Análisis físicos, químicos y microbiológicos del agua	150



Tabla 60.	Diseño de presa de bocatoma	154
Tabla 61.	Condiciones de operación de los módulos del desarenador	158
Tabla 62.	Dimensiones típicas de una canaleta Parshall para un ancho de garganta $w=0,076$	165
Tabla 63.	Características físicas de la arena	178
Tabla 64.	Análisis diferencial de partículas de arena	178
Tabla 65.	Granulometría típica para un lecho dual	180
Tabla 66.	Componentes Epanet	191
Tabla 67.	Proyecciones poblacionales Choachí	205





## GLOSARIO



- **Acueducto:** Construcción que permite el transporte de agua potable para abastecer a una población
- **Agua potable:** Es aquella que, por cumplir características físicas, químicas y microbiológicas, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 459) / Agua sometida a procesos de potabilización que permiten que sea consumida y utilizada sin restricción alguna.
- **Área:** El área de la cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro, la cual es trazada mediante el uso de mapas topográficos en función de las curvas de nivel
- **Áreas agropecuarias:** Por su oferta ambiental se utilizan para el desarrollo de actividades agricultura o ganadería.
- **Áreas forestales y agroforestales:** Zonas que permiten realizar actividades como plantaciones forestales para producción y comercialización de madera.
- **Áreas pecuarias:** Son usadas para la producción de pastos y forrajes y actividades de ganadería, debido a que por sus condiciones naturales no pueden ser utilizadas para actividades agrícolas.
- **AutoCAD:** Es un software que permite calcular el área de la cuenca por medio de coordenadas geográficas que arrojan inmediatamente el valor requerido, de manera más rápida y precisa (Torres, J. E. & Aragón, J. A., 2018, p. 38).

- **Bocatoma de fondo:** Son obras hidráulicas construidas sobre un río, donde su función es captar un caudal determinado, el cual mantiene una cantidad constante del líquido y a su vez impidiendo el ingreso de materiales sólidos
- **Bocatoma deslizante por bombeo:** Bocatomas son empleadas en ríos que cuentan con caudales grandes y de una sección relativamente ancha, el número mínimo de bombas son dos, dado que una de las bombas se encuentra en estado de reserva.
- **Bocatoma:** Estructura hidráulica que capta el agua desde una fuente superficial y la conduce al sistema de acueducto (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 461).
- **Calidad hídrica:** Aquellas condiciones que debe tener el agua para mantener un ecosistema equilibrado cumpliendo con niveles aceptables de las características físicas, químicas, biológicas y ecológicas establecidas
- **Cámara de recolección:** Generalmente es cuadrada o rectangular, con muros en concreto reforzado cuyo espesor puede ser de 30 centímetros y su altura a la de los muros laterales.
- **Canal de aducción:** Recibe el agua a través de la rejilla y entrega el agua captada en la cámara de recolección, cuenta con una pendiente entre el 1 y 14%, permitiendo dar una velocidad mínima adecuada y segura para realizar las labores de mantenimiento.
- **Canaleta Parshall:** Se describe técnicamente como un canal Venturi o de onda estacionaria o de un aforador de profundidad crítica (Torres, J. E. & Aragón, J. A., 2018, p. 186).
- **Captación:** Conjunto de estructuras necesarias para obtener el agua de una fuente de abastecimiento. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 462).
- **Caudal de diseño:** Para llevar a cabo las diferentes estructuras hidrológicas de un sistema de acueducto, es necesario determinar el caudal apropiado, el cual debe tener en cuenta las necesidades de la población de diseño y los costos de la construcción de un acueducto para un caudal excesivo.
- **Caudal máximo diario (QMD):** Consumo máximo durante veinticuatro horas, observado en un periodo de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 462) / Es la demanda máxima que se presenta en un día del año, es decir representa el día de mayor consumo en el año.
- **Caudal máximo horario (QMH):** Consumo máximo durante una hora, observado en un periodo de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 462) / Corresponde a la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo.
- **Caudal medio diario (QmD):** Es la media de los caudales instantáneos medidos a lo largo del día (Torres, J.E. & Aragón, J.A., 2018, p. 181). / Es el caudal promedio

obtenido de un año de registro y es la base para la estimación del caudal máximo diario y del máximo horario.

- **Caudal:** Es la cantidad de fluido que pasa por determinado elemento durante un tiempo definido (Torres, J. E. & Aragón, J. A., 2018, p. 181).
- **Coagulación:** “Se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Con base en el caudal a tratar se adicionan cantidades de coagulante y floculante que den paso a esta reacción” (Robles, C., Caputo, R. y Sánchez, A., 2012).
- **Conductividad eléctrica:** Parámetro que refleja la mineralización del cuerpo de agua.
- **Conflicto de uso del suelo:** Resulta de las diferencias entre el uso actual del suelo y el uso que debería tener de acuerdo con su potencial y restricciones establecidas en el ordenamiento territorial
- **Conservación:** Ecosistemas frágiles o susceptibles a sufrir deterioro no aptos para actividades agropecuarias.
- **Consumo de total:** La determinación del consumo total se debe hacer según los datos estadísticos del consumo pasado y presente de la población o sino basándose en datos de poblaciones vecinas con características similares, teniendo en cuenta los factores determinantes del consumo.
- **Consumo:** Cantidad de agua utilizada por un usuario en un periodo determinado. (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010).
- **Cuenca:** Área que reúne las aguas superficiales o subterráneas que se vierten en una red natural que desembocan en ríos principales, depósitos naturales o directamente en el océano.
- **Demanda Química de Oxígeno:** Parámetro que muestra las sustancias presentes en el agua que son susceptibles a ser oxidadas como la materia orgánica o inorgánica.
- **Desarenador:** “Tanque con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad” (López Cualla, R. A., 2003).
- **Desinfección:** Proceso selectivo que consiste en eliminar del agua los microorganismos existentes, capaces de producir enfermedades utilizando el agua como vehículo pasivo. La desinfección se realiza mediante un agente químico o físico para destruir microorganismos (Salazar, L., 2012).
- **Estudio hidrológico:** Tiene el propósito de proporcionar información sobre el estado actual de una cuenca a partir de la medición de parámetros como área, perímetro y longitud, etc.
- **Filtración:** Remover el material suspendido conocido como turbiedad (Romero R. J. A., 1999).
- **Floculación:** Se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas, una vez se desestabilicen los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar las colisiones entre ellas sin romper los flóculos (Romero, R.J.A., 1999).

- **Fuente de abastecimiento de agua:** Cuerpos de agua naturales o artificiales poco profundos o subterráneos que se utilizan para el suministro de agua potable en acueductos.
- **Fuente de abastecimiento:** Depósito o curso de agua superficial o subterránea, utilizada en un sistema de suministro a la población, bien sea de aguas atmosféricas, superficiales, subterráneas o marinas (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál. 2010, pp. 467).
- **Gestión Integral del Recurso Hídrico:** Gestión adecuada del agua y demás recursos naturales asociados cuyo propósito es encontrar un equilibrio para satisfacer las necesidades ambientales y actividades antrópicas buscando un bienestar común.
- **Hidráulica:** Se refiere a mecanismos cuyos movimientos son accionados por fuentes de agua o fluidos, en este caso está relacionado con el cauce de los ríos.
- **Hidrología:** Se relaciona con las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares, posteriormente la hidrología es el estudio de las aguas subterráneas.
- **Indicador:** Expresión cuantitativa observable y verificable que permite la descripción de un comportamiento o fenómeno a partir de la medición de variables o relación entre las mismas.
- **Índice de agua no contabilizada:** Indicador porcentual que relaciona el volumen total de agua que se suministra a las redes con el volumen total de agua que se factura a los suscriptores de estas, en un periodo determinado (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 468).
- **Longitud:** La longitud de la cuenca está definida por la longitud del cauce principal, siendo la distancia equivalente recorrida por el río, desde el punto de desagüe abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba .
- **Macromedición:** Sistema de medición de grandes caudales, destinado a totalizar la cantidad de agua que está siendo transportada por diferentes sectores del sistema (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 469).
- **Micromedición:** Sistema de medición de volumen de agua, destinado a conocer la cantidad de agua consumida en un determinado periodo de tiempo por cada suscriptor de un sistema de acueducto (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 469).
- **Ordenamiento territorial:** Acciones que se implementan para planificar una ocupación ordenada y sostenible del territorio
- **Oxígeno disuelto:** Parámetro que muestra la presencia o ausencia de organismos acuáticos.
- **Parámetros fisicoquímicos:** Variables que pueden determinar las características físicas y químicas de la muestra de agua analizada para comprender el estado actual de la calidad del agua.
- **Pérdidas comerciales:** Se refieren a las pérdidas provocadas por conexiones clandestinas y deficiencias en la cobertura de la medición del consumo (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 471).

- **Pérdidas técnicas:** Son inherentes al sistema mismo de potabilización, tales como; fugas en la red, tanques de almacenamiento y errores en la medición del consumo (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 471).
- **Pérdidas:** Diferencia entre el volumen de agua que entra a un sistema de acueducto y aquel que sale o es facturado, dependiendo del sistema (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 471).
- **Perímetro:** Es la línea base envolvente del área o divisoria de aguas, a la cual se le atribuye como la línea que separa las precipitaciones en cuencas inmediatamente vecinas y que encaminan la escorrentía.
- **pH:** Parámetro que mide el grado de alcalinidad o acidez, valores extremos afectan la flora y fauna acuática.
- **Planta de Tratamiento de Agua Potable:** Conjunto de operaciones unitarias que eliminan las características no aceptables del agua con el fin de que cumplan los valores máximos requeridos para consumo humano.
- **Planta de tratamiento o de potabilización:** Conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para efectuar procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 472).
- **Población de diseño:** La determinación del número de habitantes para los cuales se diseña el acueducto es un parámetro fundamental para el cálculo del caudal de diseño.
- **Población de diseño:** Población que se espera atender por el proyecto, considerando el índice de cubrimiento, crecimiento y proyección de la demanda para el periodo de diseño (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010, p. 472).
- **POMCA:** El Plan de Manejo y Ordenamiento de Cuencas, plantea lineamientos para el uso y manejo adecuado de los recursos naturales de manera sostenible dentro de una cuenca.
- **Precipitación:** Impulsadas por los vientos alrededor del mundo, las nubes llegan a un punto tal de saturación, que liberan el exceso de agua en forma de lluvia, nieve o granizo (Torres, J. E. & Aragón, J. A., 2018, p. 32).
- **Presa:** Esta se encuentra relacionada con la cota superior, dado que se encuentra al mismo nivel de la cota del fondo del río, construida generalmente en concreto ciclópeo, dentro de ellas se encuentra el canal de aducción.
- **Preservación:** Espacios con características de especial valor no aptos para realizar actividades agropecuarias.
- **Protección:** Aquellas unidades territoriales declaradas por la normatividad o en proceso de declararse protegidas debido a sus valores históricos o culturales como sitios arqueológicos, embalses para producir energía, acueductos entre otros.
- **Proyección de consumo:** La proyección de consumo se realiza suponiendo que el consumo neto se incrementa en un 10% con relación al incremento porcentual de la población.
- **Recuperación forestal y agroforestal:** Áreas que no están siendo utilizadas para su vocación establecida y que deben ser recuperadas para hacer estas actividades con especies y tecnologías de producción adecuadas.

- **Recuperación pecuaria:** Suelos que están degradados o no se está realizando la actividad según su vocación, que pueden ser recuperados con niveles adecuados de tecnificación.
- **Recuperación:** Zona de preservación, conservación o protección que han sufrido cambios debido a un uso inadecuado o por procesos naturales como la erosión, contaminación o sedimentación que han causado pérdida de su potencial real y que para alcanzar nuevamente su equilibrio natural se debe hacer uso de técnicas y prácticas adecuadas.
- **Rejilla:** Está se coloca sobre el canal de aducción que se encuentran dentro de la presa.
- **Restauración:** Zona de preservación o conservación que ha tenido una transformación o modificación no tan significativa.
- **Sedimentación flocculenta:** “Proceso de depósito de partículas flocculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida” (Salazar, L., 2012, p. 181).
- **Sedimentación:** “Operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión a través de la fuerza de gravedad” (Romero Rojas, J. A., 1999, p. 119).
- **Servicio de alcantarillado:** El hecho de disponer de una red de alcantarillado incrementa notablemente el consumo de agua potable.
- **SIVICAP:** Plataforma del Instituto Nacional de Salud en el que las empresas que prestan el servicio de agua potable reportan sobre la calidad del agua suministrada en sus acueductos.
- **Sobreutilización:** Cuando el uso actual excede la capacidad que puede soportar el suelo.
- **Sólidos Suspendidos Totales:** Parámetro que determina cambios en el estado hidrológico del cuerpo de agua; material que se mantiene en suspensión.
- **Subutilización:** El suelo se encuentra en un uso que desaprovecha su verdadero potencial agrológico, pero no causa deterioro.
- **Tanque de almacenamiento:** Depósito de agua en un sistema de acueducto, cuya función es suplir las necesidades de demanda en los momentos pico, permitiendo una recuperación del volumen en las horas de bajo consumo (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010).
- **Uso adecuado:** No presenta conflicto.
- **Usuario:** Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, bien como propietario del inmueble en donde éste se presta o como receptor directo del servicio (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010).
- **Zona de corredor industrial:** Áreas que se encuentran a lo largo de vías principales.
- **Zonas con potencial de inundación:** Áreas que son delimitadas según el estudio de amenazas de inundación.



## INTRODUCCIÓN



En este libro se aborda el tema de recursos naturales con énfasis en abastecimiento y calidad del agua como herramienta de gestión integral del recurso hídrico, desarrollado por el ingeniero Jesús Ernesto Torres Quintero, ingeniero civil Magister en Recursos Hidráulicos, con 40 años de experiencia profesional, 35 años de experiencia docente. Producción de cuatro libros, varios artículos científicos y es investigador Junior del grupo Tecnoambiental. Con apoyo de estudiantes, auxiliares de investigación pertenecientes al semillero de investigación Tecnoambiental e ingenieras ambientales egresadas de la Universidad Libre, la línea de investigación desarrollada es la de recursos naturales y gestión ambiental, y el proyecto de investigación es sobre la gestión integral de recursos hídricos. Esta obra es dirigida a todo público, especialmente para ingenieros y estudiantes de Ingeniería Civil y Ambiental.

Este libro de investigación hace referencia a la gestión integral del recurso hídrico en los temas de abastecimiento y calidad hídrica e investigación de evaluación hidráulica e hidrológica de acueductos.

En el capítulo 1, la gestión integral en esa investigación del río Teusaca toma relevancia en la solución de diversas problemáticas, considerando que permite analizar la calidad hídrica de forma integral, para tener una vista completa entre las interacciones naturales y antrópicas, y de esta manera, encontrar el equilibrio natural como suplir las demandas de los distintos intereses. Por esto, es importante resolver los

problemas actuales frente a la calidad hídrica, teniendo en cuenta las dificultades económicas que puede traer consigo y establecer alternativas de solución, que permitan tener a futuro un constante monitoreo ambiental con datos actualizados de las cuencas para salvaguardar el cuerpo hídrico.

En el capítulo 2, se evaluaron las condiciones hidrológicas e hidráulicas de cada una de las bocatomas de los acueductos municipales de La Vega, Girardot, Ubaque, Choachí y Sasaima, permitiendo diagnosticar el estado actual de la infraestructura, teniendo en cuenta los parámetros de oferta hídrica de demanda y revisión hidráulica de los diseños de acuerdo a la reglamentación vigente.

En el capítulo 3, el estudio de análisis hidrológico y optimización de las bocatomas del acueducto rural de Sasaima, Cundinamarca, a partir de la producción más limpia, el sistema de abastecimiento de agua estudiado fue el acueducto comunitario Regional Sur Occidente de Sasaima, con alrededor de 900 usuarios. Actualmente, está buscando ampliarse con dos veredas más (El Entable y Guayacondo), sin tener la certeza de abastecer de manera eficaz a todos sus usuarios debido a que en el año 2017 sufrió pérdida de una bocatoma de fondo ubicada en la quebrada Blanca, la cual fue removida por una creciente. Teniendo en cuenta lo anterior, se expone la necesidad del actual trabajo de investigación, ya que el acueducto no cuenta con estudios previos tanto de las infraestructuras hidráulicas como de la calidad de agua cruda, considerando que los sistemas hídricos se encuentran expuestos a posibles vertimientos de aguas domésticas y contaminantes agrícolas, de esta manera, para poder llevar a cabo este proyecto, se planteó como objetivo principal analizar a nivel hidrológico y de calidad de agua las fuentes de abastecimiento e infraestructura hidráulica de las bocatomas, aportando un valor agregado en proponer alternativas de optimización a partir de la producción más limpia con el fin de contribuir al mejoramiento continuo del servicio y logrando beneficios ambientales.

En el capítulo 4, se investigó el acueducto urbano de Choachí, Cundinamarca, se realizó el estudio hidrológico para la quebrada Potrero Grande y el nacimiento Potreritos con el fin de optimizar y adecuar la red de acueducto y abastecimiento de Choachí, el cual a pesar de contar con 12 fuentes hídricas para la red de distribución del casco urbano, solo se abastece de las fuentes mencionadas anteriormente, de las cuales no se tiene información de su capacidad hídrica por lo que se requiere desarrollar un estudio con mayor detalle, para determinar los mejores planes y estrategias en el mejoramiento de estructuras hidráulicas y así, cumplir con el abastecimiento de la población.

Este estudio se realizó con el fin de proponer una solución de optimización del acueducto del municipio de Choachí, que se puede replicar en varios municipios del país, ya que, a partir de los acueductos municipales se alcanzan a generar me-

didias correctivas para las épocas de sequía y lograr hacer un análisis de nuevas fuentes de captación.


En el capítulo 5, se investigó el sistema de acueducto veredal de Tunjaque de La Calera, Cundinamarca que cuenta con un tratamiento primario, como lo son, el desarenador y un sistema de filtración. Adicionalmente, se observa presencia de pérdidas de agua al tratarla y transportarla, y se identifican falencias en la construcción y operación de algunos de sus elementos, junto a la inexistencia de otros que tienen gran influencia en brindar una buena calidad del agua. Por lo tanto, se plantearon alternativas de diseño que permitan la optimización del funcionamiento del sistema hidráulico y de calidad del agua de dicho acueducto, desde la bocatoma hasta el tanque de almacenamiento, teniendo en cuenta las recomendaciones de varios autores que mediante la práctica han demostrado la efectividad en los procesos.

En el capítulo 6, se desarrolló una introducción al manejo de softwares de modelación hídrica para sistemas presurizados, evaluando las bondades que representa este software EPANET para el diseño de redes sin importar su magnitud, basándose en dos estudios de caso; el primero, se desarrolla en una urbanización en el municipio de Villeta, Cundinamarca; y el segundo, evalúa toda la red municipal del acueducto de Choachí, Cundinamarca.

Los capítulos del libro se desarrollaron de la siguiente manera:

- *Capítulo 1:* evaluación de la calidad hídrica como herramienta de gestión integral del recurso hídrico en el río Teusacá, capítulo desarrollado por Natalia Andrea Hernández Núñez y Jesús Ernesto Torres Quintero, desarrollado en el semillero de investigación Tecnoambiental; revisado por el ingeniero civil Edgar Obando, docente de la Universidad Católica de Colombia.
- *Capítulo 2:* evaluación hidráulica e hidrológica de los acueductos municipales La Vega, Girardot, Ubaque, Choachí y Sasaima, capítulo desarrollado por Vanessa Ahudrey Joya Flórez, Paula Pérez Gómez y Ernesto Torres Quintero en el semillero de investigación Tecnoambiental; revisado por el ingeniero Juan Antonio Aragón, docente de la Universidad Libre Magister en Ciencias-Meteorología y Haimar Ariel Vega Serrano ingeniero civil con especialización en manejo de cuencas hidrográficas y maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente.
- *Capítulo 3:* análisis hidrológico y optimización de las bocatomas del acueducto rural de Sasaima, Cundinamarca, a partir de la producción más limpia, realizado por Dania Xileth Gutiérrez Valderrama, Laura Vanessa Lotero Zapata y Ernesto Torres Quintero, desarrollado en el semillero de investigación Tecnoambiental; revisado por el ingeniero Gilberto Vallejo, docente de la Universidad libre y el ingeniero Juan Antonio Aragón, docente de la Universidad Libre Magister en Ciencias-Meteorología.

- *Capítulo 4:* evaluación de la red de acueducto y abastecimiento del municipio de Choachí, Cundinamarca desde la captación hasta la planta de potabilización, elaborado por las ingenieras ambientales Cristina Alejandra Herrera Quevedo, María Camila Poveda Orjuela egresadas y por el Ingeniero Ernesto Torres Quintero docente en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Libre; revisado por la ingeniera civil Gloria Parga, Magíster en Ingeniería Civil del IPSE, Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas.
- *Capítulo 5:* Alternativas de diseño para la optimización del sistema de acueducto vereda Tunjaque en La Calera, Cundinamarca desarrollado por Liseth Vanesa Angarita García, Karen Tatiana Quiroga Camargo y Ernesto Torres Quintero, en el semillero de investigación Tecnoambiental; revisado por el ingeniero Nikolay Agudelo docente de la Universidad Libre.
- *Capítulo 6:* Modelación hidráulica para sistemas de distribución de agua potable y estudios de caso: red de suministro potable y contraincendio en urbanización y acueducto municipal de Choachí, Cundinamarca desarrollado por el ingeniero José Nicolás Ortiz Rubiano; revisado por el ingeniero Ernesto Torres Quintero docente de la Universidad Libre.



# Evaluación de la calidad hídrica como herramienta de gestión integral del recurso hídrico en el río Teusacá



Capítulo 1

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la humanidad desde sus orígenes, sin embargo, debido al incremento de la población e industrias a nivel mundial, su demanda ha aumentado de manera significativa, tanto así que en las últimas décadas su porcentaje de uso ha sido el doble que el porcentaje de crecimiento poblacional (Cosgrove & Loucks, 2015), lo que ha ocasionado distintas problemáticas a nivel social, económico y ambiental, siendo estos parámetros los que determinan una correcta o incorrecta gestión del recurso articulado con los indicadores de calidad hídrica. Al ser la gestión integral tan relevante, se han realizado diferentes estudios a nivel mundial sobre el tema, en China, se estudiaron índices de calidad del agua modificados para evaluar la variación del río Dongjiang en su cuenca media y baja frente a parámetros físico-químicos para determinar su nivel de contaminación y estado actual teniendo en cuenta las actividades antrópicas que se realizaban a lo largo de la subcuenca (Sun, Xia, Xu, Guo, & Sun, 2016), en Bangladesh, se evaluaron los cambios sufridos por un cuerpo hídrico a través del tiempo para realizar una búsqueda y selección de aquella cuenca apta para construir estructuras de conservación en el agua según su morfometría y así resolver problemas de sequía (Rahaman, Jahan, Arefin, & Mazumder, 2017).

El aumento de la población y de la industria ha causado una reducción significativa en la calidad del recurso, afectando la apropiada calidad y cantidad para el

desarrollo de las comunidades (Mohammadi, et-ál, 2016), según el Banco Mundial, la contaminación del agua y el crecimiento económico se correlacionan entre sí debido a que en zonas donde las actividades económicas generan impactos negativos al recurso, disminuyen su PIB un 0,83% generando severos problemas como el aumento del costo de salud, la reducción en el número de trabajadores y efectos adversos en la producción agrícola (World Bank, 2019).

Aunque Colombia está catalogado como uno de los países más ricos en agua tiene, según el Estudio Nacional de Agua, un porcentaje de afectación a sufrir desabastecimiento por encima del 50% en departamentos como La Guajira, Magdalena, Cesar, Tolima, Bolívar, Quindío, Santander, San Andrés y Providencia y el Valle del Cauca; en el caso de Cundinamarca, tiene un porcentaje del 40% de desabastecimiento que podría afectar a 45 municipios (IDEAM, 2018), la cifra porcentual del municipio no es alarmante, sin embargo en un estudio realizado en el municipio de La Vega frente a la calidad hídrica de la Quebrada Reyes, demuestra que ha sido fuertemente afectado por los vertimientos de aguas residuales impactando la disponibilidad hídrica para el municipio (Suárez, Agudelo, & Forero, 2013), también se ha evaluado la calidad del agua en el río Tota y el río Bogotá por medio de los indicadores BMWP/COL y ABI para determinar que mientras la calidad hídrica del primer río presenta valores aceptables en ambos indicadores, la calidad del segundo río en su cuenca alta muestra variaciones que van desde aceptables hasta muy críticas (Meneses-Campo, Castro-Rebolledo, & Jaramillo-Londoño, 2019).

El río Teusacá pertenece a la cuenca del río Bogotá, presenta severos problemas de contaminación dada la expansión urbana e industrial que se desarrolla dentro de la subcuenca, como lo presenta (Pedraza G., 2014) al establecer que el mercado de vivienda ha cambiado el uso del suelo dentro de la Sabana de Bogotá, afectando dentro de los municipios que hacen parte del río Teusacá principalmente a La Calera, Guasca y Sopó debido a la alta demanda que ha surgido por el atractivo paisajístico, su corta distancia con la ciudad de Bogotá, su clima, entre otras características, ocasiona un aumento en la demanda de servicios públicos, generando vertimientos que afectan al cuerpo de agua.

Por ende, la importancia de estudiar este cuerpo hídrico radica en que abastece en la actualidad a algunas veredas, principalmente en La Calera, Sopó y Guasca y hace parte, en menor medida, del sistema Chingaza (provee un 80% a la ciudad de Bogotá) a través del Embalse San Rafael, el cual recibe en menor proporción las aguas del río Teusacá, aunque el sistema presenta buenas condiciones de calidad hídrica en general, también recibe con menores condiciones de calidad al río Teusacá lo que hace reducir los caudales tratados dentro del sistema (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). Además, es un cuerpo hídrico especialmente importante para el municipio de Sopó debido a que desde el 2010 se está

desarrollando el proyecto de construcción de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) que ha presentado retrasos por diferentes factores administrativos y operativos descritos por (Santacruz & Villamil, 2019), aunque se han evidenciado avances respecto al cuidado de la subcuenca, no se ha profundizado en integrar los resultados debido a la falta de gestión unificada entre las entidades administrativas territoriales presentes en la subcuenca.

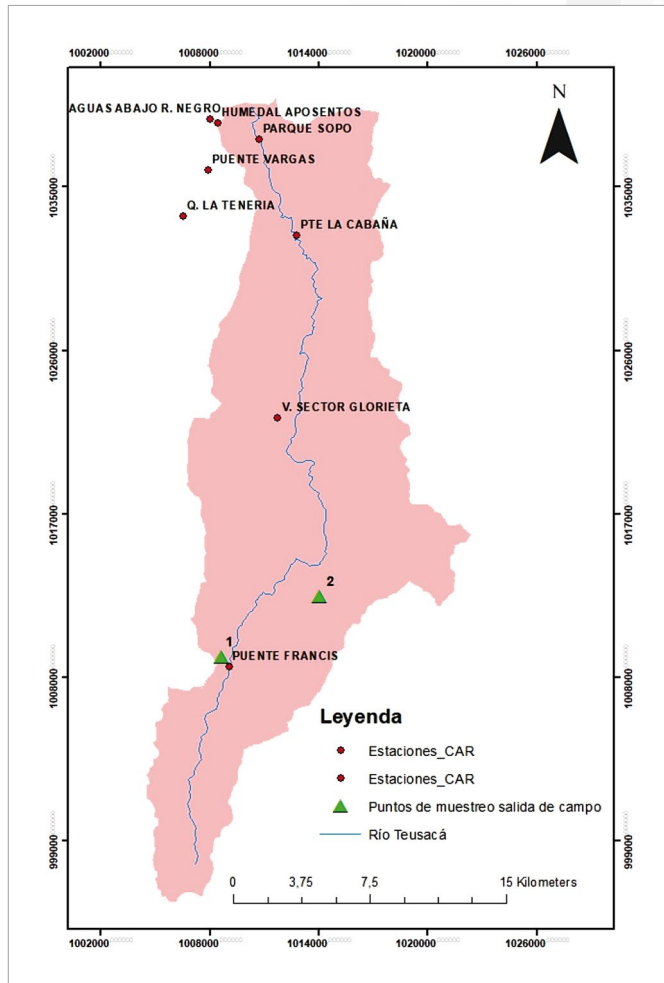
Teniendo en cuenta todo lo anterior, se plantea como objetivo de la presente investigación evaluar la gestión integral del río Teusacá en función de establecer características físicas de la subcuenca, evaluar el indicador ICA a lo largo de la subcuenca y el indicador IRCA para los municipios de La Calera, Sopó y Guasca para conocer el estado del cuerpo hídrico en el periodo de los años 2010 a 2019, y analizar por medio de herramientas SIG los resultados obtenidos a través de la elaboración de gráficos temáticos que relacionen las interacciones antrópicas presentes, permitiendo aportar herramientas que establezcan una completa gestión integral del recurso hídrico.

## 1.2 CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y METODOLÓGICAS

Se elaboró la recolección de los datos a través de fuentes secundarias, para los datos relacionados al Índice de Calidad del Agua (ICA), se realizó solicitud ante la Corporación Autónoma Regional (CAR) de las muestras analizadas entre los años 2010 a 2019, para los datos relacionados con el Índice del Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), se llevó a cabo la búsqueda de muestras por empresa prestadora de servicios públicos de los municipios de Sopó, Guasca y La Calera para el periodo de tiempo estudiado dentro de la plataforma SIMICAP del Instituto Nacional de Salud, en total se consideraron 63 muestras con 315 datos históricos por parte de la CAR y con 1242 datos de reportes por muestra de las empresas prestadoras de servicios públicos de cada municipio dentro de la plataforma. Así mismo, se realizó una visita en campo para el reconocimiento del área de estudio, en donde se establecieron dos puntos de muestreo in situ seleccionados por los autores para realizar el aforo a fin de calcular el caudal de la subcuenca.

Las estaciones de monitoreo que se tomaron en cuenta para la investigación fueron ubicadas en el software ArcGIS versión 10.5, como se puede ver en la Figura 1, sólo se contó con una estación en la cuenca alta y media respectivamente (Puente Francis y Vertimiento Sector Glorietta) y con tres estaciones en la cuenca baja (Puente La Cabaña, Parque Sopó y Humedal Aposentos), también se ubicaron tres estaciones para evaluar la calidad hídrica de la subcuenca en su desembocadura al río Bogotá (Aguas Abajo R. Negro, Puente Vargas y Quebrada La Teneria).





**Figura 1** Localización puntos de muestro.

Fuente: elaboración propia.

### 1.3 CÁLCULO DEL ICA

El ICA se define como un valor numérico que califica dentro de una de las cinco categorías, la calidad de agua de un cuerpo hídrico superficial (IDEAM, s.f.), para el cálculo de este indicador, se implementó la metodología establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; seleccionando 5 variables a estudiar las cuales son: Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Conductividad Eléctrica (CE) y pH, para cada variable se realizó su cálculo respectivo y se les asignó una ponderación de 0,2 para

un total de 1. Los subíndices  $I_i$  corresponden a la transformación adimensional de los parámetros del ICA, este indicador se categoriza entre 0 y 100, cuanto mayor es, mejor es la calidad:

$$ICAnjt = \left( \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \right)$$

Ecuación (1) Índice de calidad del agua

En donde:

$ICAnjt$ : índice de calidad del agua evaluado con  $n$  variables, en la estación de monitoreo  $j$  en un tiempo  $t$ .

$W_i$ : peso o porcentaje asignado al  $i$ -ésimo parámetro.

$I_{ikjt}$ : valor de cada variable obtenido de la variable  $i$ , en la estación  $j$  durante la medición en el trimestre  $k$  en el tiempo  $t$ .

**Tabla 1** Clasificación ICA.

Índice de Calidad	Clasificación
0,91 – 1,00	Buena
0,71 – 0,90	Aceptable
0,51 – 0,70	Regular
0,26 – 0,50	Mala
0,0 – 0,250	Muy Mala

Fuente: IDEAM.

## 1.4 CÁLCULO DEL IRCA

El Índice de Riesgo de la Calidad de Agua para Consumo Humano (IRCA) proporciona información relevante sobre el grado de ocurrencia del desarrollo de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano, que se generan por incumplir las normas sanitarias reglamentadas, este indicador presenta valores en un rango de 0 a 100 siendo 0 clasificación “sin riesgo” y 100 “sanitariamente inviable” (SISPRO).

El cálculo de este indicador se realizó siguiendo la metodología establecida en la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). El IRCA se obtiene al relacionar los puntajes de riesgo de las características que no cumplen la reglamentación, con la suma de todos los puntajes de riesgo analizados, estos puntajes están establecidos por la normatividad, como se puede ver en la Tabla 2, la cual muestra los parámetros tomados en esta investigación para analizar el indicador a partir de la

información suministrada por la plataforma SIVICAP (García, García, Rodríguez, Pacheco & García, 2018):

$$IRCA = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a todas las características analizadas}} \times 100\%$$

Ecuación (2) Índice de riesgo de la calidad del agua

La clasificación del IRCA se establece como se observa en la Tabla 2, en donde teniendo en cuenta la ponderación antes mencionada, se obtiene una clasificación de 0 a 100%, en donde 0 corresponde a un cuerpo hídrico que no presenta riesgo para el consumo humano y 100 se refiere a agua inviable sanitariamente para esta actividad (ver Tabla 3).

**Tabla 2** Parámetros evaluados para el IRCA.

Parámetro	Puntaje de riesgo	Valor máximo
Alcalinidad	1	200
Aluminio	3	0,2
Calcio	1	60
Cloro residual	15	0,3-2,0
Cloruros	1	250
Coliformes Totales	15	20000
COT	3	5
Color Aparente	6	15
Dureza Total	1	300
E. Coli	25	2000
Fluoruros	1	1
Fosfatos	1	0,5
Hierro Total	1,5	0,3
Magnesio	1	36
Manganeso	1	0,1
Molibdeno	1	0,07
Nitratos	1	10
Nitritos	3	0,1
Ph	1,5	6,5-9,0
Sulfatos	1	250
Turbiedad	15	2
Zinc	1	3
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>--</b>

Fuente: Ministerio de Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007.

**Tabla 3** *Clasificación del IRCA.*

Clasificación del IRCA	Nivel de riesgo
80% - 100%	Inviabile sanitariamente
35,1% - 80%	Alto
14,1% - 35%	Medio
5,1% - 14%	Bajo
0% - 5%	Sin riesgo

Fuente: Ministerio de Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007.

## 1.5 COMPARACIÓN DEL CONFLICTO DE USO DEL SUELO CON LA ZONIFICACIÓN AMBIENTAL ESTABLECIDA

Por medio del software ArcGIS versión 10.5, se realizó la figura de conflictos de uso de suelo con la información establecida en el mapa base del IGAC, con el fin de compararlo con la figura de zonificación ambiental establecido por la CAR para la actualización de la subcuenca del río Bogotá. Ambos mapas fueron delimitados a la zona de estudio de la presente investigación. Las categorías están definidas de la siguiente manera:

### 1.5.1 *Zonas de aptitud ambiental*

Zonas que debido a sus atributos naturales deben ser designadas para la conservación, protección y recuperación de funciones básicas, también existen áreas reconocidas por la ley a las que se le adjudica importancia especial. Dentro de estas zonas se encuentran establecidas las zonas de preservación, conservación, protección, restauración y recuperación (CAR, 2006).

### 1.5.2 *Zonas de desarrollo económico*

Zonas que permiten el uso directo o indirecto para la supervivencia o actividades económicas como la agricultura, ganadería, uso forestal y agrosilvopastoril. Se encuentran las áreas agropecuarias, áreas pecuarias, áreas forestales y agroforestales, recuperación forestal y agroforestal y recuperación pecuaria (CAR, 2006).

### 1.5.3 *Zonas de cuerpos de agua*

Áreas ocupadas por masa de agua natural o artificial, en la figura de zonificación se diferencian en embalses mayores y cuerpos de agua (CAR, 2006).

#### 1.5.4. *Otras zonas de ordenamiento*

Áreas que, por características de restricciones en el territorio por condición de uso especial, se categorizan de manera diferenciada. Se encuentran establecidas las zonas con potencial de inundación y zona de corredor industrial (CAR, 2006)

#### 1.5.5 *Conflictos de uso de suelo*

Categorizado en uso adecuado, subutilización y sobreutilización (CAR, 2006)

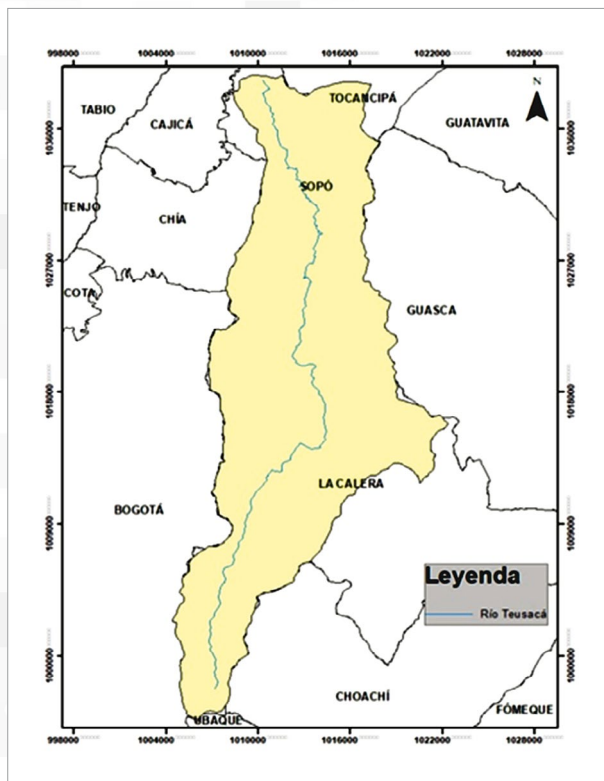
### 1.6 MARCO GEOGRÁFICO Y LEGAL

#### 1.6.1 *Marco geográfico*

La subcuenca del Río Teusacá se encuentra ubicada en la parte alta de la Cordillera Oriental, presenta una temperatura media de 12 °C, tiene un área total de 35.818,42 hectáreas con una longitud de cauce principal de 69 km aproximadamente, tiene varios tributarios importantes como las quebradas Socha, Simayá y San Lorenzo, Aguas Claras y De Mi Padre Jesús. Los suelos que están presentes en la subcuenca, tienen una fertilidad moderada con problemas de erosión debido al reemplazo de flora natural que se ha realizado. Dentro de su fauna destacan diversas especies de aves, mamíferos, anfibios, reptiles y peces (CAR, 2006).

Es administrada por tres Autoridades Autónomas Regionales, la Corporación Autónoma Regional (CAR) dentro de los municipios de Chía, Sopo, La Calera y Tocancipá además de la ciudad de Bogotá D.C, por la Corporación Autónoma Regional del Guavio (CORPOGUAVIO) dentro del municipio de Guasca y por la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía (CORPORINOQUIA) dentro de los municipios de Choachí y Ubaque, como característica morfológica presenta una forma alargada y sus aguas fluyen desde los altos del Verjón y Los Tunjos en dirección sur-norte hasta que desemboca en el sector sureste del río Bogotá; dentro de esta subcuenca se desarrollan principalmente actividades de pastoreo intensivo, explotación pecuaria y ganadera y cultivo de flores.

Su topografía es variada debido a que en su nacimiento se encuentran altas pendientes y además presenta relieves montañosos en un porcentaje superior al 63,3% según lo establecido en el POMCA vigente para subcuenca (CAR, 2006), además de estar establecidas industrias cementeras y pasteurizadoras que han afectado la calidad y cantidad hídrica debido a los vertimientos domésticos, agroindustriales e industriales que ocasionan (Secretaría Distrital de Salud, 2013).



**Figura 2** Ubicación geográfica del río Teusacá.

Fuente: elaboración propia.

### 1.6.2 Marco legal

Para la presente investigación, se tuvo en cuenta la siguiente normatividad vigente relacionada con la Gestión Integral del Recurso Hídrico y calidad del agua del recurso.

Lo relacionado en la Constitución Política de Colombia con los derechos y deberes que deben cumplir el Estado y la comunidad en el uso de recurso naturales, en los artículos 8, 79, 313, especialmente en el párrafo 9 y el artículo 332 (Constitución Política, 1991).

El artículo 5 de la Ley 99 de 1993, en la cual se establecen las funciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, principalmente las contenidas en los numerales 2°, 10°, 12° y 14° (Congreso de la República, 1993).

La Ley 388 de 1997, en cuanto a principios y objetivos de esta ley se encaminan a dar directrices a los municipios de establecer el ordenamiento territorial que se

considere necesario teniendo en cuenta: “el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial” además, define el ordenamiento territorial y los componentes a tener en cuenta al momento de elaborar el Plan de Ordenamiento Territorial, el Plan Básico de Ordenamiento Territorial y el Esquema de Ordenamiento Territorial en zonas rurales y urbanas (Congreso de Colombia, 1997).

La Ley 23 de 1973, establecida para expedir el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente con el objeto de lograr un aprovechamiento racional y adecuado de estos recursos (Congreso de Colombia, 1973).

El Decreto 1594 de 1984, de acuerdo con los lineamientos para el ordenamiento del recurso en el Capítulo II, los criterios de calidad hídrica en el Capítulo IV y vertimiento de residuos líquidos en el Capítulo VI (Ministerio de Agricultura, 1984).

El Decreto 2811 de 1974, frente al uso, aprovechamiento, protección y conservación del recurso hídrico, el uso del suelo y la protección de ecosistemas acuáticos contemplados en los artículos 11, 80, 161, 178, 180, 181, 314, 316 y 319 (Presidencia de la República, 1974).

El Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamentado por el Decreto 1076 de 2015, en el cual se establece la jerarquización de los entes administrativos, determina las unidades administrativas especiales, los instrumentos financieros y el papel que desempeñan las Corporaciones Autónomas Regionales (Presidencia de la República, 2015).

El Decreto 1640 de 2012 que reglamenta los instrumentos básicos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (Presidencia de la República, 2012).

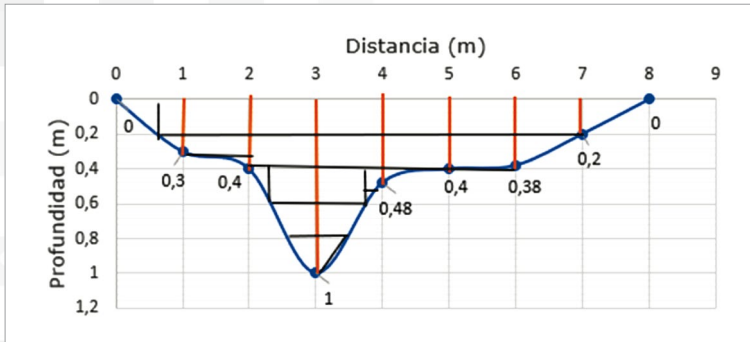
La Resolución 2115 de 2007 que reglamenta los instrumentos básicos y la frecuencia del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Por último, los instrumentos de planeación, para la presente investigación se tuvieron en cuenta los Planes de Ordenamiento Territorial, Plan Básico de Ordenamiento Territorial y Esquemas de Ordenamiento Territorial de los municipios pertenecientes a la subcuenca como también el POMCA vigente del río Bogotá en el cual está incluido el río Teusacá, este último instrumento es uno de los de mayor jerarquía que deben ser tomados en cuenta para realizar la planificación del territorio en donde se encuentre el cuerpo de agua (Gutierrez, 2020).

## 1.7 OBSERVACIONES Y ENCuentROS

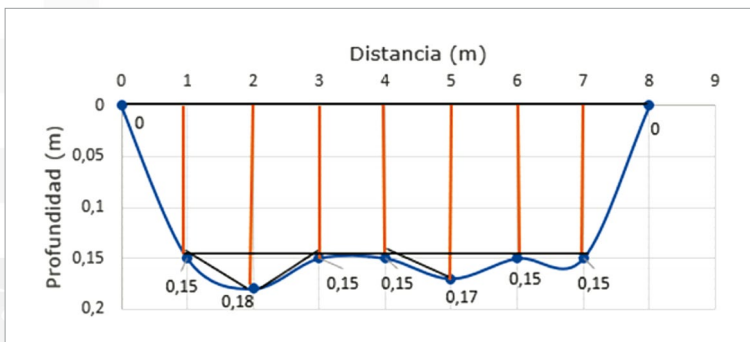
### 1.7.1 Reconocimiento del área de estudio

Se realizó toma de datos en campo dentro de la subcuenca, el punto 1 se ubicó en las coordenadas 1009087 N; 1008647 E, con cota de elevación de 2851m; el caudal obtenido fue de 2,2 m<sup>3</sup>/s; el punto 2, ubicado en las coordenadas 1012437 N; 1014044 E con cota de elevación de 2696m; tuvo un caudal de 2,7 m<sup>3</sup>/s. El aforo en ambos puntos se realizó a una distancia transversal de 8m, realizando mediciones cada metro utilizando mira, cinta métrica y molinete, este último para el cálculo de velocidad del río. A partir de los datos tomados en campo y teniendo en cuenta la distancia y la profundidad de cada tramo se obtuvo el área de cada uno de los mismos dividiendo cada tramo en figuras geométricas para posteriormente hacer el cálculo del caudal, en la Figura 3 y la Figura 4, se logra evidenciar el procedimiento realizado.



**Figura 3** Aforo del Río Teusacá en el punto 1.

Fuente: autoría propia, 2019.



**Figura 4** Aforo del Río Teusacá en el punto 2.

Fuente: autoría propia, 2019.



### 1.7.2 Resultados obtenidos del indicador ICA

Se realizó el cálculo del ICA para cada una de las muestras obtenidas, el orden de las estaciones que se muestra en la Tabla 4 corresponde a su ubicación partiendo de la cuenca alta hasta la cuenca baja del río, es decir, su desembocadura. Como se puede observar en dicha tabla, los valores máximos, mínimos y promedio, la cuenca presenta valores con clasificación “regular” en los nueve años estudiados en la investigación, presentando algunas variaciones en las estaciones Puente La Cabaña, Humedal Aposentos y Aguas abajo Río Negro con clasificación “buena” y “aceptable”; las estaciones Puente Francis, Vertimiento Sector Glorieta y Parque Sopó no fueron tenidas en cuenta dentro de la tabla, debido a que sólo presentaban valores de ICA correspondientes al año 2010.

**Tabla 4** Valores por muestra de las cinco variables que determinan el ICA en el periodo 2010-2019 por estación.

Estación	Fecha	Muestra	00	OH	000	SST	CE	ICA
Pte Francis	mar-10	981	6,5	7,2	39,5	0	877	0,55
V. Sector Glorieta	jun-10	2884	1	0	560	42	0	0,66
Pte La Cabaña	jun-10	982	54	72	156	0	182	0,48
Pte La Cabaña	ene-11	181	78	6,9	18,6	5,7	258	0,63
Pte La Cabaña	ago-11	3080	37	66	463	913	199	0,45
Pte La Cabaña	feb-12	678	73	7	23,2	261	79,9	0,62
Pte La Cabaña	jul-12	2438	39	20	192	20	186	0,59
Pte La Cabaña	jul-13	2184	64	7	22,5	50	109	0,53
Pte La Cabaña	may-14	1848	51	75	187	94	211	0,68
Pte La Cabaña	sep-14	3555	7	7,6	13,1	288	90	0,77
Pte La Cabaña	may-15	746	16	88	349	54	440	0,66
Pte La Cabaña	sep-15	2788	3	7	16	7	122	0,67
Pte La Cabaña	mar-16	448	581	732	325	8	232	0,61
Pte La Cabaña	sep-16	2547	55	7,1	16,1	244	42,3	0,83
Pte La Cabaña	sep-17	4011	281	691	7627	29	407	0,39
Pte La Cabaña	ene-18	287	571	7,87	34,6	4	147,8	0,66
Pte La Cabaña	may-18	2816	35	668	223	51	133	0,56
Pte La Cabaña	mar-19	905	29	7,2	17,1	9	262	0,92
Q. La Teneria	mar-10	985	06	74	434	154	365	0,61
O. La Teneria	nov-13	4037	0,1	7,6	453	185	805	0,52
Q. La Teneria	may-14	1858	02	75	0	214	1028	0,54
O. La Teneria	mar-17	661	0,08	8,4	424	200	740	0,48
Q. La Teneria	sep-17	4009	0,79	785	425	192	961	0,5
O. La Teneria	ene-18	290	186	7,88	326	140	749	0,5
Q. La Teneria	may-18	2819	14	747	128	136	691	0,52

Estación	Fecha	Muestra	00	OH	000	SST	CE	ICA
Pte Vargas	mar-10	984	1	7,1	32,5	22	575	0,67
Pte Vargas	ene-11	183	06	68	425	42	423	0,67
Pte Vargas	feb-12	680	18	7	32,6	60	205	0,51
Pte Vargas	jul-12	2440	26	667	24	667	223	0,67
Pte Vargas	nov-13	4036	1	7	28,7	533	2019	0,47
Pte Vargas	may-14	1857	1	7	449	27	401	0,55
Pte Vargas	sep-15	2790	03	6,9	36,9	225	314	0,5
Pte Vargas	mar-17	660	0,85	69	30,8	378	386	0,48
Pte Vargas	sep-17	4010	179	7,05	132	25	272	0,57
Pte Vargas	ene-18	2818	107	737	118	14	474	06
Pte Vargas	mar-19	907	13	7,4	39,9	30	962	0,66
Parque Sonó	lun-10	2882	46	0	21	17	0	0,49
H. Aposentos	mar-10	983	24	7,3	81,7	6,7	736	0,55
H. Aposentos	ene-11	182	8	78	38	122	238	0,55
H. Aposentos	ago-11	3081	46	6,7	20,4	172	127	0,58
H. Aposentos	feb-12	679	56	69	24	20	163	0,53
H. Aposentos	jul-12	2439	29	10,8	16,6	10,8	206	0,54
H. Aposentos	jul-13	2186	06	72	314	52	525	0,66
H. Aposentos	nov-13	4035	46	7,1	28,9	9	193	0,61
H. Aposentos	may-14	1856	42	75	511	12	437	0,55
H. Aposentos	sep-14	3556	53	7,2	26,1	12	269	0,62
H. Aposentos	mar-15	749	3	78	682	31	609	0,45
H. Aposentos	sep-15	2789	14	7	41,6	169	223	0,48
H. Aposentos	mar-16	449	0,57	754	86	256	1158	06
H. Aposentos	sep-16	2548	59	6,9	10	27	42,4	0,64
H. Aposentos	mar-17	659	331	69	672	138	185	04
H. Aposentos	sep-17	4012	181	7,2	171	8,7	309	0,74
H. Aposentos	ene-18	288	189	735	125	243	312	0,57
H. Aposentos	may-18	2817	36	6,78	36,1	41	171	0,44
H. Aposentos	mar-19	906	06	74	734	5	594	0,64
Aguas abajo R. Negro	jul-13	2183	28	6,9	15,4	30	144	0,81
Aguas abajo R. Negro	may-14	1846	31	76	70,9	429	840	0,56
Aguas abajo R. Negro	sep-14	3554	16	7,2	0	80	638	0,7
Aguas abajo R. Negro	mar-15	747	13	69	417	185	370	0,45
Aguas abajo R. Negro	mar-16	447	158	6,63	29,3	30	192	0,54
Aguas abajo R. Negro	sep-16	2546	25	699	388	717	142	0,72
Aguas abajo R. Negro	sep-17	4014	364	7,01	72	16	169	0,79
Aguas abajo R. Negro	may-18	2815	23	688	39	61	262	0,44

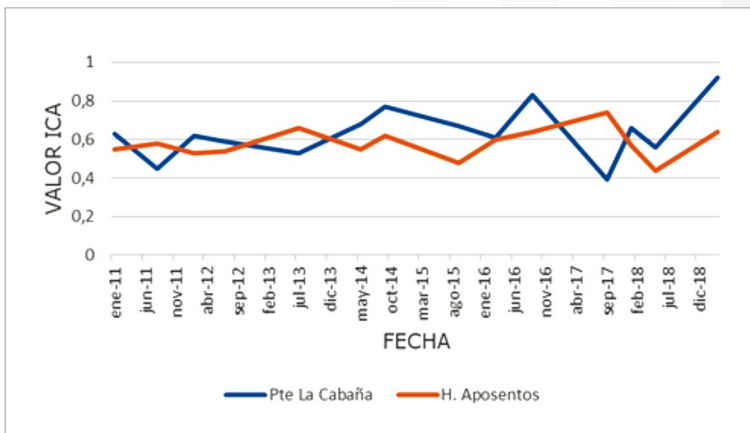
Fuente: CAR.

**Tabla 5** Resultados ICA por estación.

Estación	Max	Min	Promedio
Puente La Cabaña	0,92	0,39	0,63
Q. La Tenería	0,61	0,48	0,52
Pte. Vargas	0,67	0,47	0,58
H. Aposentos	0,74	0,40	0,56
Aguas abajo R. Negro	0,81	0,44	0,63

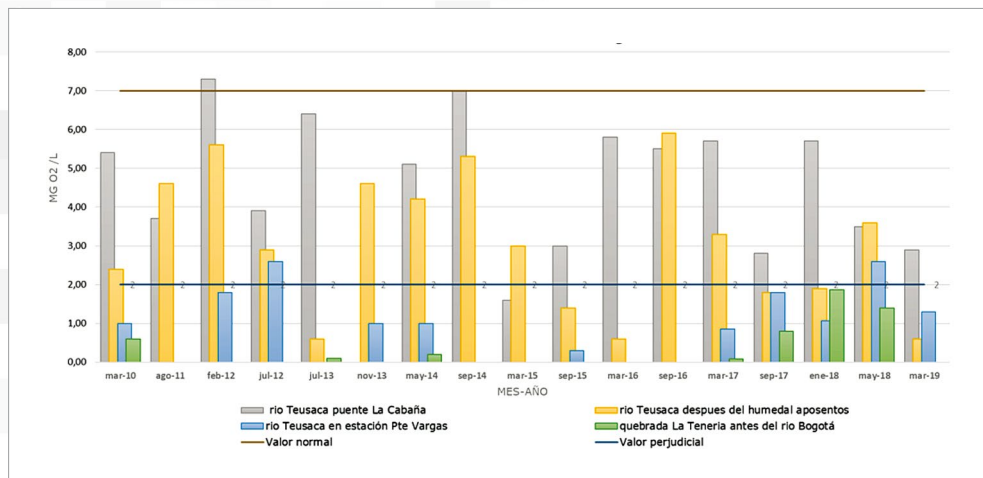
Fuente: CAR.

Las estaciones Puente La Cabaña y Humedal Aposentos fueron comparadas en cuanto a los resultados del ICA, debido a que eran las únicas estaciones de las escogidas para el presente estudio que se encontraban dentro de la subcuenca con valores constantes para el mismo periodo de tiempo estudiado (Figura 5). Se puede apreciar una clasificación “regular” a nivel histórico para los dos estaciones, sin embargo, la estación Puente La Cabaña presenta una leve mejoría en el último año con una clasificación “buena”, se puede comprobar lo establecido por (Pedraza G, 2014) en cuanto a que esta estación fue la más afectada frente a la expansión urbana, dada la descarga de vertimientos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en la zona urbana de La Calera que se encuentra ubicada cerca de la estación dada la presencia de conjuntos residenciales, por lo cual aumenta la carga contaminante y disminuye el oxígeno disuelto del río hasta su desembocadura como se representa en la Figura 5, en donde se observa una reducción de este parámetro con valores por debajo del valor normal aceptado y establecido por la CAR en la estación Humedal Aposentos en la cuenca baja y en las estaciones Puente Vargas y Quebrada La Tenería.



**Figura 5** Comparación ICA estaciones Puente La Cabaña y Humedal Aposentos en el mismo periodo de tiempo.

Fuente: CAR.



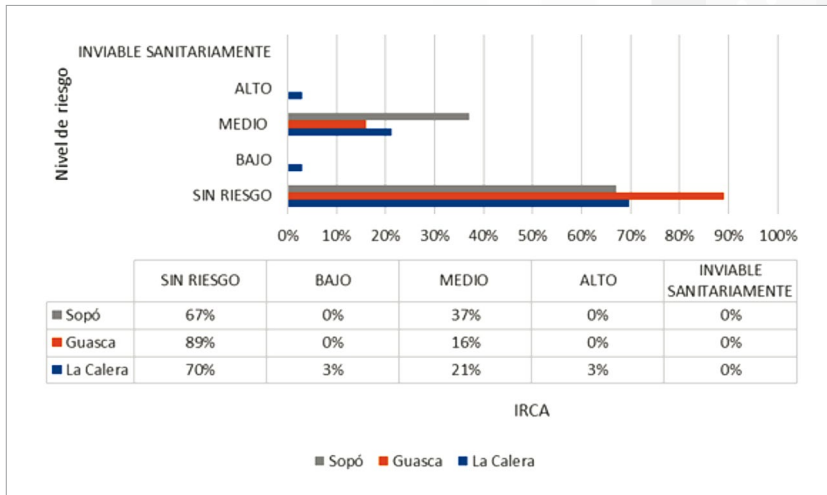
**Figura 6** Variación de oxígeno disuelto en las estaciones evaluadas.

Fuente: CAR.

### 1.7.3 Resultados obtenidos del indicador IRCA

El análisis del IRCA se desarrolló por muestra y año en un consolidado histórico para los acueductos de los municipios de La Calera, Sopó y Guasca (Figura 5), para la selección de las empresas prestadoras de servicios rural o urbano, se tuvo como criterio aquellas que captaban agua potable propiamente del río Teusacá, con lo cual se tomó como guía lo establecido por la Contraloría de Cundinamarca (2019) dentro de los municipios a realizar el estudio; sin embargo, es de aclarar que se encontraron empresas prestadoras de acueductos veredales que no tienen registros dentro de la plataforma. Teniendo referenciadas las empresas prestadoras, se realizó la descarga de los datos deseados dentro de la plataforma SIVICAP y se llevó a cabo el cálculo del indicador según la metodología establecida con ayuda del programa Excel.

Para el caso del municipio de Guasca, de las muestras analizadas de agua potable distribuida, se observó que el 89% no presentó riesgo y el 16% presentó un riesgo medio siendo la turbiedad la característica no aceptable, el municipio no registra valores catalogados como riesgo alto o inviable sanitariamente. En Sopó, se encontró que el 67% del agua suministrada presentó agua sin riesgo y el 37% riesgo medio principalmente en los acueductos veredales del municipio, siendo el cloro residual la característica no aceptable más frecuente, respecto a La Calera presentó un 70% de agua sin riesgo, 3% de riesgo bajo, 21% de riesgo medio y 3% de riesgo alto, las dos categorías anteriores principalmente en los acueductos veredales.



**Figura 7** Resultados de IRCA de las empresas prestadoras de servicios públicos.

Fuente: adaptado de SIVICAP.

#### 1.7.4 Conflicto uso del suelo

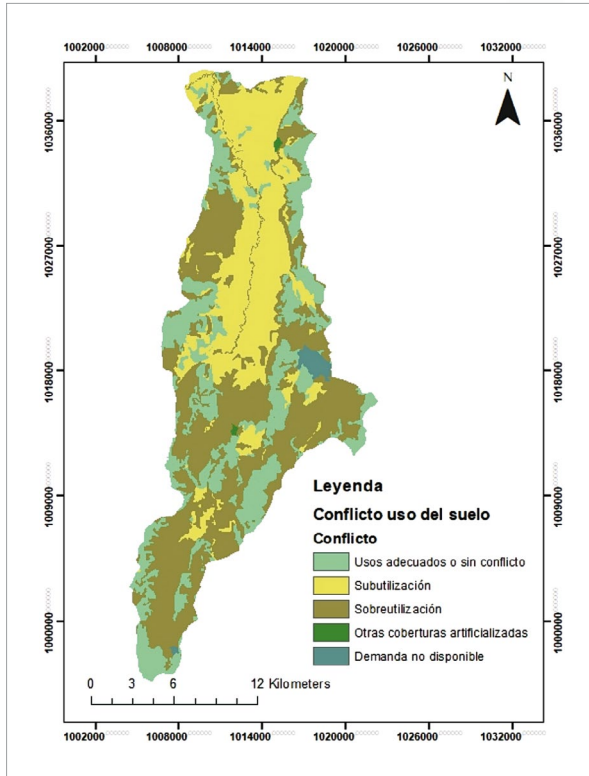
Respecto al gráfico realizado de conflictos de uso del suelo (Figura 3), y su comparación con la zonificación ambiental establecida en el POMCA del río Teusacá (Figura 4), la subcuenca presenta zonas con condición de subutilización, lo cual refiere a que se está desaprovechando el verdadero uso potencial del suelo, también se encuentran zonas con condición de sobreutilización, lo que indica que el uso actual excede la capacidad real, lo cual, representa un uso inadecuado del recurso suelo.

También se presentan zonas en menor proporción, catalogadas como uso adecuado del suelo, ya que no presentan conflictos, sin embargo, al comparar el mapa de conflictos de uso del suelo con el mapa de zonificación ambiental, se puede observar que las zonas en donde se presenta subutilización corresponden a zonas que están establecidas para uso agropecuario y pecuario, y algunas zonas con sobreutilización corresponden a establecidas para recuperación y protección, como se puede ver en la cuenca alta y en la cuenca media; zonas destinadas para las actividades agropecuarias y pecuarias presentan un conflicto de uso de suelo importante, al considerar que dentro de la subcuenca en los últimos años se ha visto una expansión urbana desorganizada, hay zonas establecidas de recuperación pecuaria dentro de la zonificación que no están siendo destinadas para tal fin, lo que evidencia degradación y pérdida del suelo, esto, representa un grave problema debido a que demuestra que los municipios de la subcuenca se expanden de manera desordenada causando graves problemas al recurso hídrico.

Los municipios tienen claro conocimiento de este problema ambiental hace tiempo debido a que, por ejemplo, en el Plan de Ordenamiento Territorial de La Calera del 2010 se afirma que la parcelación, los procesos de urbanización y las actividades agrícolas ha afectado la cuenca durante dos décadas causando graves problemas como la degradación del suelo y deterioro del paisaje, el plan establece estrategias para proteger los elementos bióticos y abióticos esenciales con el fin de preservar, conservar y restaurar (Calera, 2010).

En el Plan de Ordenamiento de Bogotá, en donde se afirma que el conocer cómo se encuentra actualmente la cuenca del río Bogotá es muy importante, debido a que los conflictos de uso del suelo producto de la urbanización y la industrialización ha afectado significativamente varias de sus microcuencas incluyendo la del río Teusacá, el compromiso del plan es proteger los ecosistemas involucrados en la infraestructura que hace parte del sistema que suministra agua potable para la ciudad (Planeación, 2020); Guasca también determinó que fenómenos como la migración y venta de tierras para fines recreativos han cambiado el uso del suelo propio del municipio de agrícola a pecuario (Guasca, 2017), uno de los objetivos establecidos en su Esquema de Ordenamiento Territorial es el de integrar las cuencas del Teusacá, Siecha, Aves y Guavio como elementos estructurales importantes el ordenamiento territorial y establece planes para reducir su impacto a través de la protección de estos cuerpos de agua (Guasca, 2019).

Dentro del alcance de los objetivos establecidos en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Sopó, se propone establecer la estructura de producción para uso agrícola, pecuario, comercial, minero, recreativo, turístico o institucional en las zonas pertenecientes al río Teusacá dentro de su territorio, promoviendo planes en la región de asistencia técnica e incentivos. La construcción permanente, las urbanizaciones, comercio o industrias no se permiten en áreas que presenten riesgos de inundación lo que difiere con lo observado en los mapas evaluados. El municipio también plantea realizar estrategias de integración entre regiones junto con La Calera y Guasca, para planificar y manejar la subcuenca y así garantizar un uso adecuado de los recursos compartidos, además, ha desarrollado planes de protección y restauración focalizados en el control de la tala de árboles, deforestación y la introducción de especies nativas que revegetalicen la zona (Sopó, 2000).

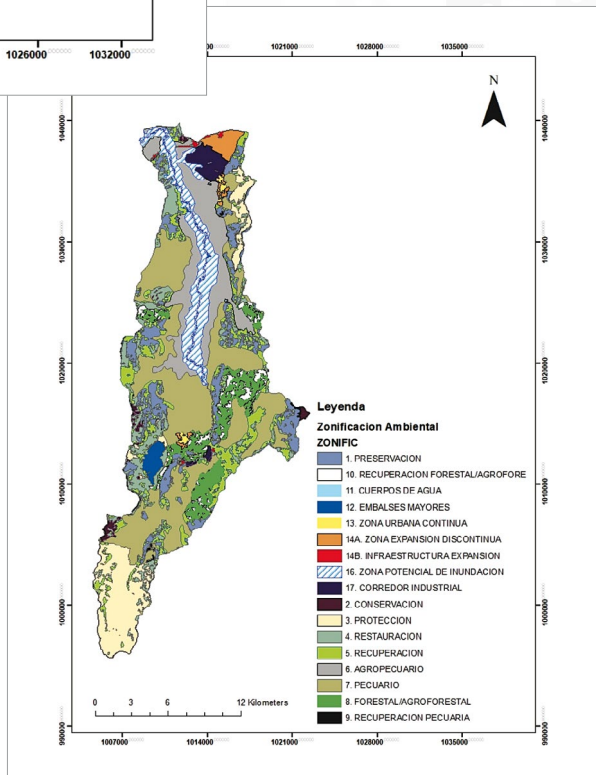


**Figura 8** Conflictos de uso de suelo dentro de la subcuenca.

Fuente: POMCA, río Teusacá.

**Figura 9** Zonificación ambiental dentro de la subcuenca.

Fuente: POMCA, río Teusacá.



## 1.8 CONSIDERACIONES FINALES

Los parámetros fisicoquímicos determinan de manera efectiva la calidad hídrica de las cuencas y subcuencas hidrográficas, estos parámetros varían según los factores contaminantes generados por actividades antrópicas, las aguas residuales municipales vierten altas cargas de materia orgánica, lo cual, implica una afectación directa al oxígeno disuelto, disminución que se refleja en el hecho de afectar considerablemente la calidad ecológica del recurso, así como en el aumento de cantidades considerables de microorganismos, como la E. Coli que comprometen el agua para el consumo humano (Suárez, Agudelo, & Forero, 2013) aumentando así las enfermedades hídricas, contribuyendo al desabastecimiento y a la disminución del desarrollo económico en el departamento (Cosgrove & Loucks, 2015), el empleo de herramientas para la gestión integral como es el caso de la herramienta ArcGIS, es fundamental para determinar con claridad las condiciones de la subcuenca, debido a que permite realizar ponderaciones que visualizan la complejidad de los problemas ambientales (Rahaman, Jahan, Arefin & Mazumder, 2017).

Relacionar las causas y efectos que se encuentran entre los parámetros y el deterioro ambiental, permite obtener mejores soluciones de gestión integral para definir estrategias de protección y prevención en la subcuenca y así encontrar un equilibrio natural (Grizztti, Lanzanova, Liqueste, Reynaud & Cardoso, 2016). Lo anterior, coincide en la subcuenca del río Teusacá donde las concentraciones de OD son menores en una estación cercana al río Bogotá en donde se espera que su control y manejo sea adecuado para mitigar la contaminación del río Bogotá. Por tanto, el ecosistema tanto acuático como biótico presente en esta estación tiene enorme deterioro al ocasionar la muerte de gran parte de la especie de peces, la calidad hídrica también se ve afectada al enriquecerse de nutrientes derivados de cultivos agrícolas (Meneses-Campo, Castro-Rebolledo & Jaramillo-Londoño, 2019).

Utilizar indicadores como el Índice de Calidad del Agua, como determinante de la situación actual del río tiene como desventaja que la ponderación subjetiva de los parámetros limita su conocimiento, dado que puede asignar un resultado que no concuerde con la misma, por tal razón no debe ser tomado como el único indicador que permita comprender la gestión integral que se le realiza al recurso hídrico estudiado (Pedraza, 2014). Al realizar el cálculo del ICA se encontró que la toma de muestra para su análisis por parte de la CAR a lo largo de los años evaluados, no se efectuó en las mismas estaciones, meses y años establecidos, por lo tanto, no fue posible realizar una evaluación completa por falta de registros sobre todo en la cuenca alta del río. Respecto al IRCA, se pudo observar que los municipios a los cuales el río Teusacá abastece de agua potable consumen agua sin riesgo, sobre todo en el municipio de Guasca; se recomienda que las empresas prestadoras de servicios públicos en zonas veredales tengan información actualizada respecto a los



reportes que realizan en la plataforma SIVICAP dado que se evidenció que algunas empresas no reportan sus mediciones, lo cual, hace que no sean tomadas en cuenta para estudios como el presente o similares en la zona y no se conozcan de manera completa todos los acueductos veredales que se abastecen de este río, lo cual, también es importante al momento de realizar una planificación adecuada frente a acceso de agua potable y saneamiento básico y distribución de viviendas para tal fin dentro de la subcuenca.

Teniendo en cuenta lo encontrado en el estudio de (Sener, Sener , & Davraz, 2017), cabe resaltar la importancia que para la presente investigación tiene la utilización del ICA y del IRCA como herramientas de diagnóstico de la calidad hídrica, aunque la ponderación se realiza de manera subjetiva dependiendo de la calificación de los autores, permite evidenciar las falencias en la gestión por parte de las autoridades y visualizar el grado de contaminación de la subcuenca con el transcurso de los años. Es importante de igual forma realizar estudios taxonómicos que permitan identificar la pérdida de especies en la subcuenca y así evidenciar de manera aún más completa la calidad del agua del recurso hídrico analizado. Al comparar los mapas de conflicto de uso del suelo y zonificación ambiental, se observó que no se está realizando una gestión integral completa dentro de la subcuenca, debido a que no existe relación entre lo establecido por las Autoridades Ambientales con lo presente dentro de la subcuenca, se establece la necesidad de verificar.

Como se logra observar, la gestión integral toma importancia relevante en la resolución de diversas problemáticas, debido a que permite analizar la calidad hídrica en forma integral (Sener, Sener & Davraz, 2017) para tener una vista completa entre las interacciones naturales y antrópicas y así encontrar el equilibrio natural para suplir las demandas de los distintos intereses (Grizztti, Lanzanova, Lique, Reynaud & Cardoso, 2016). Por esto, es importante resolver los problemas actuales frente a la calidad hídrica, teniendo en cuenta los problemas económicos que puede traer consigo y proponer alternativas de solución, que permitan tener a futuro un constante monitoreo ambiental con datos actualizados de las cuencas, para salvaguardar el cuerpo hídrico para consumo o uso industrial en el futuro (Alterburger y otros, 2019).

La gobernanza es muy importante para implementar completa y adecuadamente la gestión integral del recurso hídrico, ya que permite brindar resultados duraderos y efectivos que se obtienen aún más cuando la población que pertenece a la subcuenca se apropia del recurso que posee como bien lo establecen las normas a través de mecanismos de participación a su disposición dentro de la planificación territorial. Es responsabilidad de las entidades territoriales el incentivar esta participación, por medio de estrategias como la educación ambiental para hacer tomar conciencia sobre la importancia que tiene el río para su comunidad al abastecerles de agua potable, tal como lo ha venido implementando la empresa prestadora Progresar ESP,

empresa que tiene como fuente abastecedora al río Teusacá, sin embargo, se observa que existen diferencias en cuanto a las decisiones que toman las instituciones que la administran y planifican dado que cada una las toma por separado sin tener un objetivo y meta en común (Gutierrez, 2020); es importante realizar un estudio posterior acerca de la condición actual de la subcuenca frente a su oferta hídrica para la implementación de estrategias más efectivas.

El análisis del ICA expuso gran afectación en la subcuenca principalmente por la disminución de oxígeno disuelto, lo que implica establecer herramientas de gestión urgentes para evitar la pérdida del río como cuerpo receptor de especies por la pérdida de su ciclo biológico natural, por otra parte, este estudio también evidenció que aunque se está suministrando agua potable en buenas condiciones para los municipios que se abastecen de este río, es importante terminar el proyecto de la PTAP en Sopó, dado que beneficia en mayor medida a su población y reduce el riesgo a presentar enfermedades relacionadas con la calidad hídrica del recurso siempre y cuando se administren de manera adecuada los recursos suministrados para el proyecto, es importante hacer un monitoreo y seguimiento frecuente de las empresas prestadoras de servicios públicos para llevar un mejor control. También se estableció que, aunque los lineamientos organizacionales para la correcta gestión del recurso existen, aún se encuentran deficiencias en la concordancia con los mismos, se requiere la toma de medidas más estrictas para aquellos actores frente a la subcuenca que se encuentren ubicados de manera que perjudique la calidad hídrica del agua.

# Evaluación hidráulica e hidrológica de las bocatomas de La Vega, Girardot, Ubaque, Choachí y Sasaima



## Capítulo 2

## 2.1 INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como campo de investigación la evaluación hidrológica e hidráulica, de las bocatomas de los municipios de La Vega, Girardot, Ubaque, Chochí y Sasaima, según la Resolución 0330 de 2017.

Dado que, a través de los años las bocatomas presentan un desgaste en su funcionamiento y en su infraestructura causando grandes daños para la potabilización del agua, y a su vez impidiendo un correcto suministro del servicio de acueducto para la población, haciendo necesaria la constante vigilancia, el control y mantenimiento de estas infraestructuras, teniendo en cuenta la legislación vigente, se puede establecer que el grado de adecuación del índice del suministro de agua no es adecuado para las poblaciones futuras.

Según Herrera y Poveda (2014) establecen que la mayoría de los municipios de Cundinamarca cuentan con el servicio de acueducto, el cual se abastece por medio de bocatomas de los principales cuerpos de agua, brindando una mejor calidad del agua, permitiendo satisfacer las necesidades de la población. Pérez (2004), plantea que una mala ubicación de las bocatomas puede conllevar a un deterioro de la infraestructura, puesto que ocasiona erosión en los revestimientos de los suelos.

Con relación a lo anterior, este capítulo tiene como objetivo evaluar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de cada una de las bocatomas de los acueductos muni-

cipales, permitiendo diagnosticar el estado actual de la infraestructura teniendo en cuenta los parámetros de diseño.

## 2.2 CONSIDERACIONES TEÓRICAS Y METODOLÓGICAS

Para la elaboración de la presente investigación, se tuvo en cuenta la metodología implementada en el libro de elementos de diseño para acueducto y alcantarillado, permitiendo llevar a cabo la evaluación hidrológica e hidráulica de las bocatomas. Donde se realizó una investigación cuantitativa, mediante tres fases, las cuales son:

- **Primera Fase:** se realizó el estudio hidrológico donde se determinó el área, perímetro y longitud del cauce principal, de los ríos donde está ubicada cada una de las bocatomas mediante la utilización del Software ArcGIS.
- **Segunda Fase:** se determinó la población de diseño, mediante los censos realizados por el DANE, en los municipios de la Vega, Girardot, Ubaque, Choachí y Sasaima, empleando los métodos lineales, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. Posteriormente, se obtuvo el consumo de agua de cada uno de los municipios teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la Resolución 0330 del 2017 de Agua Potable y Saneamiento Básico. De manera que se establecieron los caudales de diseño (caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario).
- **Tercera Fase:** una vez determinados los diversos caudales de los ríos correspondientes a los acueductos municipales, se procedió a verificar si el diseño planteado, cumple con los parámetros propuestos a nivel reglamentario.

### 2.2.1 Bocatomas de fondo

Las bocatomas son obras hidráulicas, las cuales tienen como función captar una parte del curso de un cuerpo de agua, para luego ser dirigido por medio de tuberías hasta el acueducto. Esta se encuentra conformada por una rejilla en la parte superior de la presa, la cual permite dirigir el sentido normal de la corriente. De igual manera, el ancho que presenta la bocatoma puede ser mayor o igual al ancho que presenta el río.

### 2.2.2 Bocatoma de La Vega

El municipio de La Vega, se encuentra ubicado en la región andina, en el departamento de Cundinamarca, está localizado a 54 Km al noroccidente de Bogotá, tiene una extensión de 153,52 km<sup>2</sup>, este municipio se encuentra a 1230 m.s.n.m. Este municipio cuenta con los ríos Tabacal, Gualivá, Perucho e Ilá. Limita con los municipios de Nocaima y Vergara al norte, al sur con Facatativá, al occidente con Sasaima y al oriente con los municipios de Supatá y San Francisco.

El sistema de acueducto del municipio de La Vega, cuenta con dos bocatomas, las cuales se encuentran localizadas sobre el río Ilá, y Perucho, estas dos bocatomas son de tipo fondo, con un sistema de desarenador y una cámara de recolección.

La bocatoma del río Ilá cuenta con dos rejillas, la primera rejilla tiene dimensiones de 2,2, m de largo por 0,5 m de anchos, cada barra tiene 1 pulgada de diámetro, con una separación entre cada una de 1 pulgada, la segunda rejilla tiene 0,6 m de largo por 0,3 m de ancho, con barrotes de ½ pulgada de diámetro y una separación de ½ pulgada entre cada uno.

Por otro lado, la bocatoma del río Perucho, está constituida por un muro de 5 m de largo y cuenta con una rejilla de 1,10 m de largo por 0,22 m de ancho, los barrotes son de ½ pulgada de diámetro, separadas cada una por 1 cm.

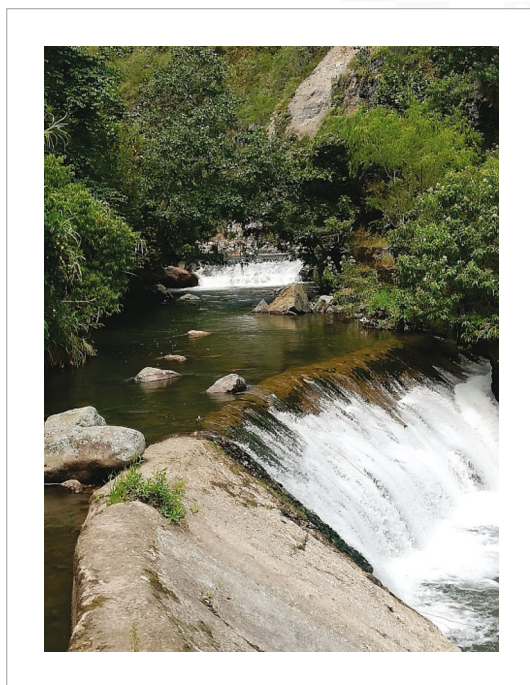
Con relación al servicio de acueducto y alcantarillado, este no satisface de forma adecuada y completa a la población, en épocas de invierno se presentan crecientes en los ríos Ilá y Perucho, originando daños en la infraestructura de la bocatoma, ya que la tubería empleada en este sistema es de asbesto-cemento, lo cual ocasiona pérdidas de agua. Por otro lado, el crecimiento poblacional que ha presentado este municipio genera que cada vez sea menos la población beneficiada por este servicio.

### 2.2.3 Bocatoma de Ubaque

El municipio de Ubaque es patrimonio ecológico y cultural del departamento de Cundinamarca, el cual se encuentra situado detrás de los cerros de Monserrate y Guadalupe, a una distancia de 56 Kilómetros de la Capital de la república. Cuenta con un área de 104.96 km<sup>2</sup>, la cual está dividida en área rural con una extensión de 104,82 km<sup>2</sup> y área urbana con una extensión de 0,14 km<sup>2</sup>; una altitud de la cabecera municipal de 1867 msnm y un clima medio, con temperatura promedio de 18°C. De igual manera, se encuentra limitando al norte con el municipio de Choachí, al sur con los municipios de Cáqueza y Chipaque, al oriente con el municipio de Fómeque y al occidente con la ciudad de Bogotá. Dado que este se encuentra conformado por 21 veredas y el centro urbano.

Los principales afluentes que distinguen el municipio de Ubaque son el río Palmar y el río Negro, donde el más relevante es el río Palmar, dado que este permite abastecer a la comunidad a través de la red de acueducto municipal, ya sea para el aprovechamiento de actividades agropecuarias como las labores de riego. Dicha red de acueducto y alcantarillado solo satisface al 51% de la población, esto indica que no todos los pobladores cuentan con el suministro de agua necesario para el consumo y desarrollo de las principales actividades que se llevan a cabo en el municipio.

La bocatoma de este municipio se encuentra ubicada en las coordenadas 735702.4 E y 042858.2 N, a una altura es de 2693 m.s.n.m.



**Figura 10** Bocatoma de Ubaque.

Fuente: autoría propia.

#### 2.2.4 Bocatomas de Choachí

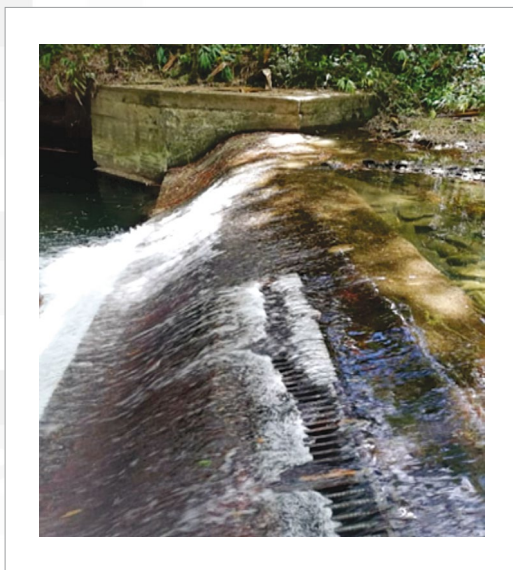
El municipio de Choachí se encuentra ubicado en la Provincia del Oriente del departamento de Cundinamarca, la cabecera municipal se encuentra localizada en 04°31'52" de latitud norte y de 73°55'33" de longitud oeste, la altura con respecto al nivel del mar es de 1900 m.s.n.m. Este municipio limita al norte con el municipio de La Calera, al sur con el municipio de Ubaque, por el oriente limita con el municipio de Fómeque y por el occidente con Bogotá.

El municipio cuenta con una extensión de 223 km<sup>2</sup>, el área urbana es de 10.4km<sup>2</sup> y el área rural cuenta con 213 km<sup>2</sup>, las principales actividades económicas que se llevan a cabo en este municipio son, la explotación agrícola, pecuaria y minería.

La captación del acueducto municipal se hace del río Palmar, a una altura de 2200 m.s.n.m. cuenta con una rejilla de fondo la cual permite encauzar el agua al tanque del desarenador ubicado a una distancia de 200 m de la bocatoma.

Dado el crecimiento de la población de este municipio, se construyó una bocatoma alterna a la quebrada Potrero Grande, con el fin de abastecer de forma completa y adecuada a toda la población, por medio de estudios realizados se pudo determinar que esta infraestructura no cumple con los estándares estipulados para el abastecimiento de los acueductos y alcantarillados de este municipio.

### 2.2.5 Bocatomas de Sasaima



**Figura 11** Bocatoma de Sasaima.

Fuente: autoría propia.

Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el municipio de Sasaima se encuentra localizado en el departamento de Cundinamarca, limitando por el norte con Villeta y Nocaima, al oriente con la Vega, al sur con Facatativá y por el occidente con Albán y Villeta.

El municipio de Sasaima cuenta con zonas urbanas del 24.50% de la población y 75.50% de zonas rurales, los cuales hacen uso del servicio de acueducto y alcantarillado, captado del río Guane, el cual en los últimos años ha presentado disminución de caudales, generando así afectaciones en la calidad del agua, ocasionada por la sobreexplotación forestal y bovina, impidiendo a su vez que el servicio no sea del 100% para su población, dando lugar a prácticas indebidas de captación del agua. Según estudios realizados, la bocatoma se encuentra sobredimensionada respecto a su rejilla, dado que las medidas obtenidas son menores a las de la bocatoma real.



Sasaima se encuentra ubicado en la cuenca de Río negro, a la cual pertenecen los ríos Guane y Dulce, los cuales son utilizados por el acueducto del municipio según la CAR. Donde sus coordenadas son 0962565 E y 1038298 N y su altura es de 1406 m.s.n.m presentando una temperatura promedio de 22°C.

### 2.2.6 Bocatoma deslizante por bombeo

Este tipo de bocatomas son empleadas en ríos que cuentan con caudales grandes y de una sección relativamente ancha, el número mínimo de bombas es dos, dado que una de las bombas se encuentra en estado de reserva. La rejilla evita el paso de elementos grandes, los cuales pueden llegar a impedir la entrada al pozo de succión o la misma coladera de la tubería de succión, se debe establecer una protección al talud usando muros de contención.

Las estaciones de bombeo deslizante son usadas para captar el agua de ríos donde se presenta gran fluctuación de niveles; estas estaciones son colocadas sobre dos rieles, los cuales suben o bajan operando, una malacata colocada en tierra firme.

### 2.2.7 Bocatoma de Girardot



**Figura 12** Bocatoma de Girardot.

Fuente: autoría propia.

El municipio de Girardot se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca, donde su cabecera Municipal se encuentra localizada en 4.18.18 Latitud Norte y 74.48.06 Longitud Oeste. A su vez se encuentran limitando al norte con el municipio de Nariño y Tocaima, al sur con el municipio de Flandes y el Río Magdalena, al oeste con el río Magdalena y el municipio de Coello, y al este con el municipio de Ricaurte

y el Río Bogotá. El municipio cuenta con una extensión de 138 km<sup>2</sup>, con 2046 hectáreas que corresponden al área urbana.

Girardot se encuentra abastecido por el río Magdalena, en este municipio se encuentra la planta de tratamiento que cuenta con 31 tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo, redes de matrices y locales, se encuentra ubicada a 4°18'21.21" N y 74°48'01.94" O, a una altura de 285 m.

El municipio de Girardot cuenta con dos plantas de tratamientos ubicadas en Ricaurte y Acapulco. La planta de potabilización de Ricaurte, cuenta con una bocatoma de tipo lateral la cual ha presentado fallas en su funcionamiento y en su estructura, generando disminución en la captación del caudal necesario para el abastecimiento de la población.

## 2.3 MARCO LEGAL

**Tabla 6** Normativa aplicable.

Normativa	Aspectos aplicables
Ley 09 de 1979	Se aplican las siguientes medidas sanitarias estipuladas en los siguientes artículos: <b>Artículo 53:</b> Las entidades responsables de la entrega del agua potable al usuario deberán establecer: Normas de operación e instalaciones auxiliares, incluyendo registros estadísticos. <b>Artículo 64:</b> En todo sistema de conducción de agua, los conductos y accesorios deben protegerse lo suficiente, para garantizar que el agua no se contamine. En lo posible, la conducción debe ser cerrada y a presión.
Resolución 03300 de 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.
Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
Ley 99 de 1993	Sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
Decreto Ley 2811 de 1974	Por lo cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Título 5 de las Obras Hidráulicas.
Decreto 1323 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencia del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Fuente: autoría propia.

## 2.4 OBSERVACIONES Y ENCUENTROS

### 2.4.1 Municipio de La Vega

El Estudio hidrológico del municipio de La Vega, se lleva a cabo en la bocatoma del río llá, el cual es uno de los cauces que abastece a la población, junto con el río Peruchó, en este estudio se determinaron el área, perímetro y longitud de la cuenca del río llá, estos parámetros se obtuvieron empleando el Software ArcGis, usando una plancha a escala 1:100000, con sistema MAGNA de Colombia Bogotá, esta plancha fue obtenida por el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. En la Tabla 7, se pueden observar los respectivos cálculos obtenidos durante este estudio.

**Tabla 7** Dimensiones de la cuenca del río llá.

Generalidades	Valor	Unidades
Área	761,05	Km <sup>2</sup>
Perímetro	146,09	Km
Longitud	36,11	Km

Fuente: autoría propia.

La determinación de la demanda poblacional se obtuvo a través de una proyección de población hasta el año 2045. Donde de acuerdo al artículo 40 de la Resolución 0330 del 2017, establece que todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, implementan un modelo con periodo de diseño 25 años, empleando los censos poblacionales realizados por el DANE en el municipio de La Vega, utilizando diversos métodos como lo son el crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. Asimismo, se calculó el promedio para el resultado de la proyección poblacional, dando paso a la identificación del incremento poblacional y el consumo neto, basado en los parámetros que dicta la resolución nombrada anteriormente.

**Tabla 8** Demanda poblacional municipio de La Vega.

Año	Lineal (hab)	Geométrico (hab)	Logarítmico (hab)	Estadístico (hab)	Sensibilidad (hab)	Promedio (hab)
2020	19253	20324	16478	15192	23245	18899
2031	20623	22390	18020	16499	29317	21450
2045	22366	26365	20192	18325	40414	25532

Fuente: autoría propia.

El municipio de La Vega cuenta con una altura con respecto al nivel del mar de 1230 m.s.n.m. Para la determinación de los valores de caudales de diseño me-

dio diario, máximo diario y máximo horario, es necesario tener en cuenta la proyección de la población de los respectivos años (Tabla 9), dado que según lo estipulado en la Resolución 0330 de 2017, en el artículo 47 parágrafo 2, se establecen las variables K1 y K2 las cuales son empleadas si la población proyectada es mayor o menor a los 12000 habitantes, el porcentaje de pérdida de agua en el sistema es de 25% según lo estipulado en la misma resolución. El incremento poblacional del municipio entre los años 2020 al 2031 es del 13,5% y entre los años 2031 y 2045 es del 19,0%.

**Tabla 9** Proyección de consumo municipio de La Vega.

Año	Población	Incremento poblacional	Incremento dotación	Consumo neto	%P	Consumo total	QmD(l/s)	QMD (l/s)	QMH(l/s)
2020	18899	0,135	0,0135	130	0,25	173	37,84	45,41	68,11
2031	21450			131	0,25	176	42,95	51,54	77,31
2045	25532	0,190	0.0190	133	0,25	179	51,12	61,35	92,02

Fuente: autoría propia.

#### 2.4.1.1 Análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del municipio de La Vega

La bocatoma del río Ilá capta un caudal de 42,00 L/s, el cual es llevado a la PTAP del municipio, la cual trata un caudal de 35,5 L/s, esto indica que se presenta pérdidas del 15,4%. De acuerdo a la resolución 0330 de 2017 en el artículo 44 parágrafo 1, establece pérdidas hasta del 25% en el sistema, permitiendo que esta bocatoma presente un funcionamiento óptimo. Según los datos obtenidos en la proyección poblacional y la proyección de consumo, se determina que para poblaciones del 2045 se verá afectado el suministro de agua, dado que requiere de un caudal de 61,34 L/s.

En el estudio hidráulico se establece que el río Ilá cuenta con dos rejillas, la primera tiene 2,2, m de largo por 0,5 m ancho, con barras de 1 pulgada de diámetro con una separación de 1 pulgada, y la segunda rejilla presenta dimensiones de 0,6 m de largo por 0,3 m de ancho, con barras de ½ de pulgada y una separación de ½ de pulgada. La segunda rejilla no es utilizada en el proceso de captación, dado que cuenta con una tabla de madera, la cual direcciona el caudal solamente para la primera rejilla. Por otro lado, en épocas de invierno, la bocatoma presenta fallas en su funcionamiento, por el crecimiento del río.

## 2.4.2 Municipio de Girardot

El municipio de Girardot es abastecido por el río Magdalena, este río es el principal afluente del país, dado que es de gran importancia para el desarrollo de las comunidades. Para llevar a cabo el estudio hidrológico que presenta este río, fue necesario el uso de las planchas 1:100000, para la determinación de las principales curvas de nivel, esta plancha fue obtenida del geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, con ayuda del Software ArcGis, se delimitó el área, perímetro y longitud de la cuenca que abarca el río Magdalena, como se evidencia en la Tabla 10, la georreferenciación para la elaboración de este gráfico es MAGNA de Colombia - Bogotá.

**Tabla 10** Dimensiones de la cuenca del río Magdalena.

Generalidades	Valor	Unidades
Área	6412,188	Km <sup>2</sup>
Perímetro	467,84	Km
Longitud	204,228	Km

Fuente: autoría propia.

Para la demanda poblacional del municipio de Girardot, se tuvo en cuenta el artículo 40 de la Resolución 0330 del 2017, donde establece que todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo adopten un modelo con un periodo de diseño de 25 años. De acuerdo a lo anterior, se utilizó una proyección de población hasta el año 2045, a partir de los censos poblacionales realizados por el DANE en el municipio, mediante los métodos de crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. Por medio de los resultados obtenidos, se calculó el promedio de la proyección poblacional, asimismo se continuó a la identificación del incremento poblacional y el consumo neto, según los parámetros propuestos por la resolución.

**Tabla 11** Demanda poblacional municipio de Girardot.

Año	Lineal (hab)	Geométrico (hab)	Logarítmico (hab)	Estadístico (hab)	Sensibilidad (hab)	Promedio (hab)
2020	155033	187018	152033	184721	193668	174295
2031	170723	239286	188369	233947	256223	217711
2045	190692	327448	249524	315429	369610	290541

Fuente: autoría propia.

El municipio de Girardot cuenta con un consumo neto de 140 L/hab día según la Resolución 0330 de 2017, dado que este municipio se encuentra a 275 m.s.n.m, el crecimiento de población entre el año del 2020 al 2031 es de 24,9% y entre 2031 y 2045 es de 33,5%, como se puede ver en la Tabla 12, el caudal medio diario hace

referencia al promedio obtenido de registros en un año, el caudal máximo diario es el caudal que se presenta en un día del año y el caudal máximo horario es el caudal registrado durante una hora en un año completo. Para la determinación del consumo total de la población, se debe tener en cuenta el artículo 47 parágrafo 2, en el cual se establecen los valores de  $k_1$  y  $k_2$  teniendo en cuenta si la población es mayor o menor a 12000 habitantes, esta relación se hace con los valores promedios obtenidos en la tabla de proyección poblacional del municipio.

**Tabla 12** *Proyección de consumo municipio de Girardot.*

Año	Población	Incremento poblacional	Incremento dotación	Consumo neto	%P	Consumo total	QmD (l/s)	QMD (l/s)	QMH (l/s)
2020	174295	0,249	0,0249	140	0,25	187	385,26	462,31	693,47
2031	217711	0,335	0.0335	143	0,25	191	481,23	577,48	866,21
2045	290541			148	0,25	198	642,21	770,65	1155,98

Fuente: autoría propia.

#### 2.4.2.1 Análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del municipio de Girardot

Según la visita realizada al acueducto Acuagyr S.A E.S.P., se establece que la bocatoma de tipo deslizante por bombeo capta un caudal de 500000 L/s, el cual abastece a la población de manera adecuada; por otro lado, este sistema no cuenta con un respaldo en caso de falla o mantenimiento, lo cual ocasiona que en épocas del año la calidad del agua no sea adecuada para el consumo humano. De modo que esta bocatoma es suministrada por uno de los afluentes principales del país (río Magdalena), permitiendo a las poblaciones futuras el adecuado suministro de acueducto y alcantarillado.

De acuerdo a la Resolución 0330 de 2017 en el artículo 46 parágrafo 3, establece que, si en el sistema de captación es por bombeo en aducción, el caudal de diseño corresponde al caudal máximo diario (QMD) proyectado al periodo de diseño, afectado por el porcentaje de horas diarias por bombeo.

El estudio hidráulico de este sistema de captación, cuenta con un sistema de rejilla que impide el paso de material sólido y flotante que puede llegar afectar el funcionamiento de la infraestructura, este sistema presenta dos bombas sumergibles, las cuales operan con un caudal de 460 L/s aproximadamente, estas bombas son de tipo centrífugas de captación superficial.

### 2.4.3 Municipio de Ubaque

Para llevar a cabo el estudio hidrológico del río Palmar, se calculó área, perímetro y longitud de la cuenca que abarca este río, empleando el Software ArcGis con una plancha 1:100000 para la determinación de las curvas de nivel que hacen parte del municipio, esta plancha fue obtenida del geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el sistema de referenciación para la elaboración de los mapas es MAGNA de Colombia Bogotá. En la Tabla 13, se evidencian los respectivos datos obtenidos por el mapa.

**Tabla 13** Dimensiones de la cuenca del río Palmar.

Generalidades	Valor	Unidades
Área	112,732	Km <sup>2</sup>
Perímetro	46,64	Km
Longitud	12,14	Km

Fuente: autoría propia.

La demanda poblacional, se determinó mediante una proyección de población hasta el año 2045, en los cuales se obtuvieron los censos poblacionales realizados por el DANE en el municipio de Ubaque, a través de los métodos de crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. De acuerdo con lo anterior, se calculó el promedio para el resultado de la proyección poblacional. Según el artículo 40 de la Resolución 0330 del 2017, establece que todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, implementan un modelo con periodo de diseño 25 años; posteriormente la identificación del incremento poblacional y el consumo neto, basado en los parámetros que dicta la presente resolución.

**Tabla 14** Demanda poblacional municipio de Ubaque.

Año	Lineal (hab)	Geométrico (hab)	Logarítmico (hab)	Estadístico (hab)	Sensibilidad (hab)	Promedio (hab)
2020	7035	7037	7684	7662	6774	7238
2031	7080	7084	7816	7713	6637	7266
2045	7138	7143	7988	7779	6476	7305

Fuente: autoría propia.

El municipio de Ubaque está a 1867 m.s.n.m, por lo cual se establece que el consumo neto con respecto a la altura para el municipio es de 130 (L/hab día) según lo estipulado en la Resolución 0330 del 2017 en el artículo 43 sobre dotación neta máxima, posteriormente, para el cálculo de la proyección de consumo (Tabla 15)

se establece una pérdida de agua de 25%. La determinación de los caudales de diseño se realiza con base a los datos obtenidos en la Tabla 11, teniendo en cuenta que, para la determinación del caudal máximo diario, el artículo 47 parágrafo 2 de la misma resolución, establece los valores respectivos de K1 y K2 con respecto a si la población futura es mayor o menor a 12000 habitantes.

**Tabla 15** *Proyección de consumo municipio de Ubaque.*

Año	Población	Incremento poblacional	Incremento dotación	Consumo neto	%P	Consumo total	QmD (l/s)	QMD (l/s)	QMH (l/s)
2020	7238	0,004	0,0004	130	0,25	173	14,80	17,76	26,64
2031	7266			130	0,25	173	14,86	17,83	26,75
2045	7305	0,005	0.0005	130	0,25	173	14,94	17,93	26,89

Fuente: autoría propia.

#### 2.4.3.1 Condiciones hidrológicas e hidráulicas del municipio de Ubaque

De acuerdo a la visita realizada a la bocatoma en el río Palmar del municipio de Ubaque, se estableció que el río cuenta con un caudal de 48 L/s. Para la determinación del caudal, fue empleado el método de molinete, realizando un aforo con una distancia de 1 m entre cada punto a lo largo del ancho del río. Con relación a los caudales de diseño calculado en la Tabla 12, se puede determinar que el caudal del río es apto para abastecer a las poblaciones futuras, dado que el crecimiento poblacional entre el año 2020 al 2031 es del 0,4% y para los años 2031 al 2045 es del 0,5%.

Según el estudio realizado por Botello (2017), la bocatoma cuenta con una rejilla de 0,766 m de largo, 0,0254 m de ancho y 10 orificios, pero el diseño actual de la bocatoma no es acorde al caudal que tiene el río Palmar, por lo cual se establecen los nuevos parámetros de diseño, para mejorar su funcionamiento y abastecer de forma adecuada a la población.

#### 2.4.4 Municipio de Choachí

Para llevar a cabo el estudio hidrológico de la Quebrada Potrero Grande, desde el punto de captación, se usaron las planchas cartográficas del municipio, encontradas en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:25000. Por medio de la utilización del Software ArcGis y la Resolución 0330 del 2017, en el ar-



título 41, establece que todos los elementos que conforman los componentes de los sistemas de acueducto y alcantarillado deben utilizar el sistema de referencia MAGNA de Colombia Bogotá. Posteriormente, con la utilización de las curvas de nivel, se calculó área, perímetro y longitud (Tabla 16) de la cuenca principal que abastece el acueducto del municipio de Choachí.

**Tabla 16** Dimensiones de la cuenca de la Quebrado Potrero Grande.

Generalidades	Valor	Unidades
Área	112,732	Km <sup>2</sup>
Perímetro	46,64	Km
Longitud	12,14	Km

Fuente: autoría propia.

La determinación de la demanda poblacional se tuvo en cuenta una proyección de población hasta el año 2045, a partir de los censos poblacionales realizados por el DANE en el municipio de Choachí, por medio de los métodos de crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. Según el artículo 40 de la misma resolución, para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, se adopta como periodo de diseño 25 años; mediante esto se continuó a identificar el incremento poblacional y el consumo neto.

**Tabla 17** Demanda poblacional municipio de Choachí.

Año	Lineal (hab)	Geométrico (hab)	Logarítmico (hab)	Estadístico (hab)	Sensibilidad (hab)	Promedio (hab)
2020	15329	15984	16341	15186	16245	15817
2031	16325	17643	18084	14378	18252	16936
2045	17592	20005	20574	16214	21341	19145

Fuente: autoría propia.

El municipio de Choachí se encuentra a 1924 m.s.n.m, por lo cual según el Resolución 0330 del 2017 se establecen un consumo neto es de 130 (L/hab día), teniendo en cuenta el incremento de dotación se establece el consumo neto de los años siguientes, se estipula un 25% de pérdidas de agua en el sistema, el consumo total para el periodo de diseño debe tener en cuenta el incremento del consumo neto y la disminución en el índice de pérdidas. El caudal promedio diario, es el caudal obtenido en un año de registros y es la base para la estimación del caudal máximo diario, el cual es el mayor consumo en el año y máximo horario corresponde a la demanda máxima que se presenta en cada hora durante un año.

**Tabla 18** *Proyección de consumo municipio de Choachí.*

Año	Población	Incremento poblacional	Incremento dotación	Consumo neto	%P	Consumo total	QmD(l/s)	QMD (l/s)	QMH(l/s)
2020	15817	0,071	0,0071	130	0,25	173	31,67	38,00	57,01
2031	16936			131	0,25	175	33,91	40,69	61,04
2045	19145	0,130	0.0130	133	0,25	177	38,33	46,00	69,00

Fuente: autoría propia.

#### 2.4.4.1 Análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del municipio de Choachí

El municipio de Choachí, cuenta con un sistema de acueducto el cual se encuentra abastecido por la Quebrada Potrero Grande y el Nacedero Potreritos. Donde según Torres, A y Rincón C, la Quebrada Potrero Grande suministra 45 l/s cada día, de acuerdo al estudio realizado para el año 2045 se evidencia un incremento poblacional de 19145 habitantes, el cual requiere un suministro de caudal máximo diario de 46 l/s, este caudal fue calculado según la Resolución 0330 de 2017 en el artículo 47 párrafo 2, establece un valor de K1 de 1,2 ya que la población es mayor a 12000 habitantes para el año 2045, con relación a lo anterior, se puede determinar que para ese año la población no contará con su respectivo servicio de acueducto.

El estudio hidráulico realizado por Herrera, C y Poveda, M se establece que la bocatoma de este municipio cuenta con una rejilla 10 orificios y una longitud de 0.654 m, permitiendo la captación del afluente de la Quebrada Potrero grande, por lo cual se puede determinar que la bocatoma no suministra de forma adecuada y completa a la población.

#### 2.4.5 Municipio de Sasaima

Para el estudio hidrológico de la cuenca del río Guane, se tuvo en cuenta las 4 planchas cartográficas del municipio, encontradas en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:25000. Por medio de la utilización del Software ArcGis se determinaron el área, perímetro y longitud que abarca la cuenca, teniendo en cuenta el uso del sistema de referencia MAGNA de Colombia Bogotá. En la Tabla 19, se encuentran las dimensiones correspondientes del río Guane.

**Tabla 19** Dimensiones de la cuenca del río Guane.

Generalidades	Valor	Unidades
Área	21.62	Km <sup>2</sup>
Perímetro	25.62	Km
Longitud	10.57	Km

Fuente: autoría propia.

La demanda poblacional del municipio de Sasaima se obtuvo mediante una proyección de población hasta el año 2045, a través de los censos poblacionales realizados por el DANE, a partir de los métodos de crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, estadístico y sensibilidad. Por medio de los resultados obtenidos, se calculó el promedio de la proyección poblacional. De acuerdo al artículo 40 de la Resolución 0330 del 2017, establece que todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, implementan un nivel de complejidad, basado en un modelo con periodo de diseño 25 años, mediante el cual se realizó la identificación del incremento poblacional y el consumo neto, apoyado en los parámetros que dicta la presente resolución.

**Tabla 20** Demanda poblacional municipio de Sasaima.

Año	Lineal (hab)	Geométrico (hab)	Logarítmico (hab)	Estadístico (hab)	Sensibilidad (hab)	Promedio (hab)
2020	13117	13616	11316	10978	14900	12785
2031	13924	14965	12140	11626	17534	14038
2045	14974	16801	13278	12473	21721	15849

Fuente: autoría propia.

Sasaima se encuentra a 1150 m.s.n.m, por lo cual el consumo neto para este municipio según la Resolución 0330 de 2017 es de 130 (L/hab día), teniendo en cuenta el incremento de dotación para los años siguiente, el consumo total para el periodo de diseño está relacionado con el incremento del consumo neto y la disminución en el índice de pérdidas de agua en el sistema, dado que según la resolución las pérdidas son del 25%. En la Tabla 21, se puede evidenciar el consumo de agua para para poblaciones futuras a 25 años, teniendo en cuenta el crecimiento poblacional, dado que entre el año 2020 al 2031 se da un incremento del 9,8% de la población y para los años 2031 y 2045 el incremento de la población es del 12.9%.

**Tabla 21** Proyección de consumo municipio de Sasaima.

Año	Población	Incremento poblacional	Incremento dotación	Consumo neto	%P	Consumo total	QmD (l/s)	QMD (l/s)	QMH (l/s)
2020	12785	0,098	0,0098	130	0,25	173	26,15	31,37	47,06
2031	14038			131	0,25	175	28,71	34,45	51,67
2045	15849	0,129	0.00129	133	0,25	177	32,41	38,89	58,34

Fuente: autoría propia.

#### 2.4.5.1 Análisis de las condiciones hidrológicas e hidráulicas del municipio de Sasaima

Según la visita de campo en el municipio de Sasaima, se determinó que el caudal del río Guane es de 27 l/s, este caudal se calculó mediante el método de molinete el cual consiste realizar un aforo tomando 1 m de distancia, respecto al ancho del río. Teniendo en cuenta los resultados de la proyección de consumo (Tabla 21), se logra evidenciar que el caudal máximo diario de las poblaciones futuras es mayor al caudal suministrado por el río Guane, por lo que, el abastecimiento del servicio de acueducto para la población no es suficiente para el consumo y desarrollo de las principales actividades que se llevan a cabo en el municipio.

De acuerdo a la Resolución 0330 del 2017 en el artículo 47, establece que los caudales de diseño de cada uno de los componentes del sistema de acueducto, cuentan con variaciones diarias y horarias que presenta el afluente.

En el estudio hidráulico de la bocatoma se determinaron las dimensiones respectivas teniendo en cuenta el caudal de diseño de 42,13 L/s, como se puede evidenciar en la Tabla 22. Según los datos obtenidos, se estableció que la bocatoma se encuentra sobredimensionada con respecto a la rejilla de la obra de captación, dado que en la salida de campo se estableció que la rejilla cuenta con 2,60 m de largo y 0,42 m de ancho, pero con relación a los cálculos de dimensión el largo de la rejilla debería ser 1,52 m con 0,31 m de ancho y 66 orificio.

**Tabla 22** Dimensiones bocatoma de Sasaima.


Generalidades	Valor	Unidades
Caudal de diseño	0,04215	m <sup>3</sup> /s
Velocidad del río	0,026	m/s
Distancia entre barrotos (a)	0,004	m
Diámetro de barrotos (b)	0,0191	m
Número de orificios (No)	66	
Longitud de la rejilla	1,52	m
Ancho (B)	0,31	m

Fuente: autoría propia.

## 2.5 CONCLUSIONES

- El municipio La Vega cuenta con un adecuado sistema de captación de agua, haciendo posible suministrar a la población, pero para el año 2045 la infraestructura no será apta para suplir las necesidades de los habitantes, por el crecimiento poblacional.
- La bocatoma del municipio de Girardot se encuentra en óptimas condiciones, sin embargo, al no tener un sistema de respaldo a la hora de fallas o mantenimientos, hace que la calidad del agua no sea apta para el consumo humano, generando suspensión en el servicio.
- El río Palmar se encuentra ubicado en un sector de fallas geológicas, lo cual ocasiona la disminución del recurso hídrico en temporadas secas, causando que no se suministre de forma adecuada a la población, de manera que se establecen nuevos parámetros de diseño.
- El crecimiento de la población del municipio de Choachí, no contará con el respectivo servicio de acueducto y alcantarillado, para cumplir las necesidades de los habitantes, dado que el caudal requerido es mayor al caudal suministrado por el afluente de este municipio.
- La bocatoma de Sasaima está sobredimensionada, respecto a su rejilla, dado que las medidas obtenidas son mayores a las planteadas por el diseño realizado.





# Análisis hidrológico y optimización de las bocatomas del acueducto rural de Sasaima, Cundinamarca a partir de la producción más limpia



Capítulo 3

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial se ha visto una vulneración del derecho humano al acceso de agua y saneamiento, consecuencia de la desigualdad y el deterioro de los recursos hídricos (Valdés, E. y Uribe, E., 2016). Gran parte de la población que se ve afectada son las personas de las zonas rurales porque en su mayoría se le vulnera el derecho a la salud y al medio ambiente sano, debido a la dificultad para acceder a un servicio público domiciliario como el servicio de acueducto, sin contar con la prestación del servicio de saneamiento, según lo mencionado en el folleto del derecho al agua publicado por la Organización de las Naciones Unidas. (ONU, 2018).

Para el año 2017, se calculó que 2.100 millones de personas a nivel mundial carecen de abastecimiento de agua y el 84% de estas personas se encuentran en zonas rurales (OMS, 2017). Con base en lo anterior, las comunidades en las zonas rurales tienen una relación directa con el cuidado de la cuenca, pues se debe garantizar la protección de esta para poder realizar una buena captación y brindar el servicio de acueducto garantizando cantidad y calidad, debido a que tiene un efecto que influye en el bienestar de la comunidad.

De acuerdo con la Corte Constitucional, según la Sentencia T-242 del 2013, para Colombia se establece que el derecho al agua se basa en la disponibilidad, accesibilidad, y calidad, por lo que es fundamental que la población cuente con los servicios públicos de suministro de agua potable que garantice el bienestar gene-



ral y una calidad de vida adecuada, sin embargo, las poblaciones en la zona rural tienen un déficit en lo que se refiere a vivienda y acceso a servicios públicos de acueducto y alcantarillado.

Entre los años 2015 y 2016, el 89.6% de los hogares colombianos contaban con servicio de acueducto. La cobertura de este servicio en las cabeceras municipales fue 97.5% y en la zona veredal fue del 60.1% (DANE, 2016). Por otro lado, el sector urbano de Cundinamarca cuenta con una cobertura de acueducto cercana al 97.71%, pero en el sector rural apenas llega al 43.7% (Gobernación de Cundinamarca, 2012), demostrando la vulneración de este servicio básico. Respecto a Sasaima, en el año 2016 la cobertura de acueducto en la zona urbana es del 98.5% y para la zona rural de 41.2% (Alcaldía Municipal de Sasaima, 2016).

Estas cifras arrojan el déficit en el que se encuentran las veredas frente al suministro de agua potable en la cabecera municipal. Sasaima presenta bajos niveles de cobertura y en su mayoría, la calidad de los sistemas de acueducto no es la adecuada. El acueducto comunitario Regional Sur Occidente de Sasaima, ubicado en la vereda Santa Inés, actualmente se encuentra constituido por una bocatoma lateral situada en la quebrada Pauda y abastece a nueve veredas: San Bernardo, La Victoria, Acuapal, Nariz Alta, Mojón, Santa Inés, Santa Ana, Las Mercedes y La Paz, es decir alrededor de 900 usuarios.

Actualmente, está buscando ampliarse con dos veredas más (El Entable y Guayacondo), sin tener la certeza de abastecer de manera eficaz a todos sus usuarios, debido a que en el año 2017 sufrió pérdida de una bocatoma de fondo ubicada en la quebrada Blanca, la cual fue removida por una creciente. Teniendo en cuenta lo anterior, se expone la necesidad del actual trabajo de investigación, ya que el acueducto no cuenta con estudios previos tanto de las infraestructuras hidráulicas como de la calidad de agua cruda, considerando que los sistemas hídricos se encuentran expuestos a posibles vertimientos de aguas domésticas y a contaminantes agrícolas.

Para poder llevar a cabo este proyecto, se planteó como objetivo principal analizar a nivel hidrológico y de calidad de agua las fuentes de abastecimiento e infraestructura hidráulica de las bocatomas, aportando un valor agregado el cual consistió en proponer alternativas de optimización a partir de la producción más limpia, con el fin de contribuir al mejoramiento continuo del servicio y logrando beneficios ambientales.

La investigación se desarrolló mediante tres fases. La primera, consistió en un levantamiento topográfico por el método de altimetría para determinar el perfil y las pendientes de los cauces. Posterior a esto, se caracterizó geomorfológicamente a las cuencas de abastecimiento mediante la medición del área, perímetro, longitud

de drenaje, tributarios, orden de los cauces, patrón y densidad de drenaje; se indicó el factor de forma, el índice de compacidad, el índice de variabilidad y el tiempo de concentración.

Por otro lado, se calculó la precipitación media, la curva de intensidad, duración y frecuencia, los caudales máximos y mínimos, la curva de duración de caudales y el balance hídrico con relación a las condiciones climáticas de la zona. Finalmente, se procesó la información mencionada anteriormente en el software ArcGIS versión 10.5.

En la segunda fase, se evaluó la calidad de agua por medio del Índice de Calidad de Agua (ICA), en el cual se analizaron los parámetros tales como, el Oxígeno Disuelto (OD), los Sólidos Suspendidos Totales (SST), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Conductividad Eléctrica (CE) y el pH. Se realizó el razonamiento matemático propuesto por el IDEAM, para determinar el índice y así se clasificó según el nivel de calidad en el que se encuentran las quebradas Blanca y Pauda.

Por último, en la tercera fase, se diseñó la bocatoma de fondo la cual requieren construir debido a la ampliación que pretende realizar el acueducto. En cuanto a la captación lateral, se llevó a cabo el diseño y se comparó entre la diseñada y la que se encuentra operando actualmente, con base en el resultado se propusieron estrategias de optimización con ayuda de alternativas de producción más limpia proporcionando ahorro de materia prima, mejorando la eficiencia de la captación y evitando pérdidas de agua.

## 3.2 MARCO GEOGRÁFICO Y MARCO LEGAL

A continuación, se exponen los marcos tanto geográfico, como legal necesarios para el desarrollo de esta investigación:

### 3.2.1 *Marco geográfico*

El municipio de Sasaima está ubicado sobre la zona noroccidental del Departamento de Cundinamarca. Pertenece a la Provincia del Gualivá, Situada al Noroeste de Bogotá. Su cabecera municipal se ubica a los 04° 58' 53" de latitud norte y 74° 26' 13" de longitud oeste, con una temperatura media de 22° C. Tiene una superficie de 140 Km<sup>2</sup>.

Su altitud oscila entre los 850 y 1.950 msnm. Entre los accidentes orográficos se destacan Las Peñas del Aserradero, el cerro de La Morena, El Cerro de Icalí, Alto de San José, de la Cruz, del Viajal, de los Cabros, del Guásimo, y de Nariz Alta (Escobar R., 2018).

### 3.2.2.1 *División político administrativa*

Políticamente, el municipio se encuentra dividido en 24 veredas: Pilacá, Limonal, Lomalarga, Palacio, La Granja, Mesetas, La Paz, Acuapal, Nariz alta, Guayacundo, Santa Ana, Buenos Aires, Candelaria, Iló, El Entable, El Mojón, San Bernardo, Guane, Gualivá, Piluma, Santa Teresa, La Victoria, Las Mercedes y El Sinaí (Alcaldía Municipal de Sasaima, 2016).

### 3.2.2.2 *Población*

Según el DANE, para el año 2018 la población de Sasaima era de 10.711 habitantes, de los cuales 2.555 habitantes pertenecían a la cabecera municipal, y 8.156 correspondían a la población rural.

### 3.2.2.3 *Estructura geográfica*

La topografía resalta tres zonas: zona alta de recarga de acuíferos, clima de páramo y con suelos con vocación forestal; zona media altamente intervenida por minifundismo con ampliación de la frontera agrícola; zona baja ubicada en cercanías del perímetro urbano con mayor desarrollo de vivienda, presenta un alto impacto por contaminación con vertimientos residenciales al sistema hídrico (Escobar R., 2018).

### 3.2.2.4 *Geología, geomorfología local y Recurso suelo*

Los suelos de Sasaima son de clima medio húmedo y muy húmedo, con o sin influencia de materiales volcánicos. Son suelos con alto contenido de materia orgánica (de 2.5 a 6 % de Carbón orgánico). La constitución mineralógica de la fracción arena, en los suelos de esta zona corresponden a feldespatos, anfíboles, piroxenas y cuarzo (Escobar, 2018).

### 3.2.2.5 *Uso del suelo*

El suelo de Sasaima se utiliza como soporte de las actividades antrópicas productivas (cultivos de caña panelera), para construcción de infraestructuras, (vías y urbanizaciones, fincas de recreo y condominios urbanos, suburbanos y rurales), como fuente de materiales de construcción (arena, recebo, piedra) y como receptor de impactos y de contaminación con residuos sólidos y líquidos (Escobar, 2018).

### 3.2.2.6 *Recurso hídrico*

El municipio de Sasaima se encuentra ubicado en la cuenca del Río Negro, que lo conforman los municipios de Albán, Bituima, Caparrapi, El Peñón, Guaduas,

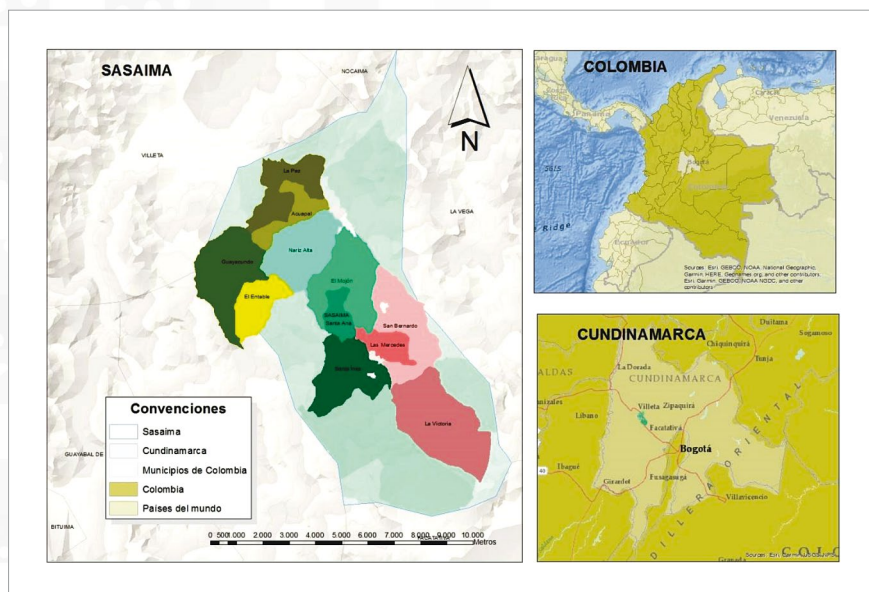
Guayabal de Siquima, La Palma, La Peña, La Vega, Nimaima, Tocaima, Pacho, Puerto Salgar, Quebrada Negra, Sasaima, San Francisco, Supata, Topaipi, Utica, Vergara, Viani, Villeta y Yacopi.

El municipio de Sasaima - Cundinamarca se caracteriza por tener una gran riqueza hídrica, y está comprendida por las cuencas de los ríos Dulce y El Gualivá (Escobar, 2018).

### 3.2.2.7 Área de Estudio

El acueducto se encuentra localizado en el municipio de Sasaima (Cundinamarca), exactamente en la vereda Santa Inés. Como se mencionó anteriormente, Sasaima cuenta con veinticuatro veredas, donde nueve de estas se abastecen del acueducto Regional Sur Occidente de Sasaima, las cuales son: San Bernardo, La Victoria, Acupal, Nariz Alta, Mojón, Santa Inés, Santa Ana, Las Mercedes y La Paz.

El acueducto busca expandirse con dos veredas más, las cuales son: El Entable y Guayacundo, ampliando la zona de estudio con un total de 42.958 Ha. En la Figura 13 se visualiza la ubicación del área de estudio a nivel nacional, regional y local, permitiendo observar el área de estudio donde se desarrolló la investigación; se representa la ubicación del municipio resaltando las veredas que abastecen el acueducto.

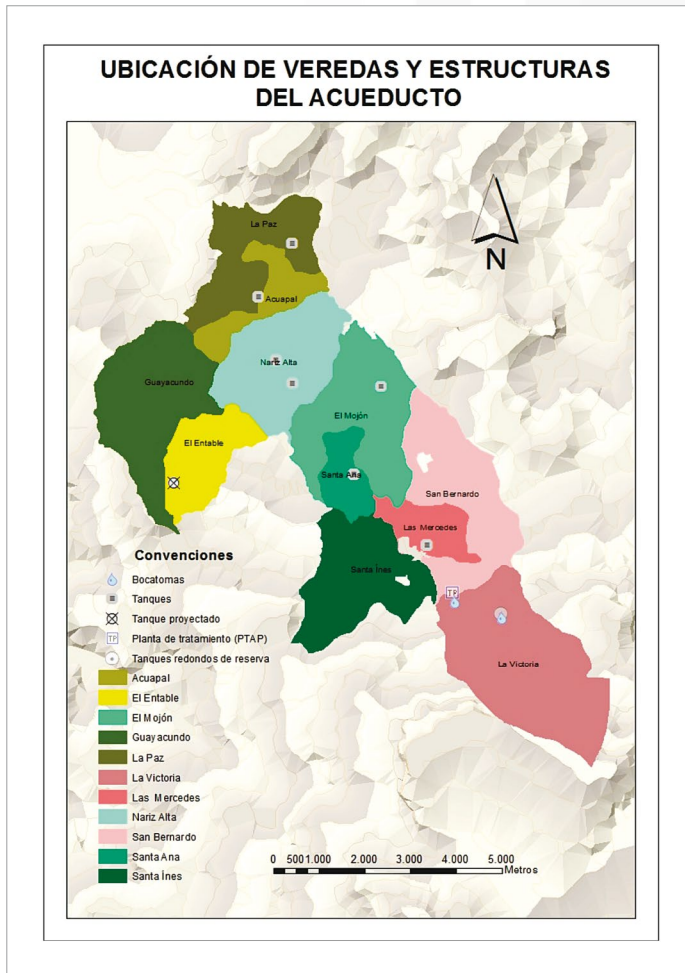


**Figura 13** Ubicación general del área de estudio.

Fuente: autoría propia.

*Nota. El mapa representa la ubicación del municipio de Sasaima con las respectivas veredas resaltando las veredas que abastecen el acueducto. La ubicación del área de estudio se hace a nivel nacional, regional y local.*

Teniendo en cuenta que el acueducto se quiere ampliar, se está haciendo una proyección de un tanque en la vereda de El Entable. También tiene un tanque redondo de reserva en la quebrada Blanca. En la vereda Santa Inés cuentan con la planta de tratamiento primario, donde se tienen siete tanques sedimentadores y filtradores. De acuerdo con la información recolectada en la primera visita al acueducto, se realizó un mapa a escala 1:5000 –como se observa en la Figura 14–, que representa las veredas que abastece el acueducto y permite ubicar las estructuras del acueducto y ver el área de influencia. Este mapa fue elaboración propia en el año 2020, con base cartográfica tomada del IGAC:

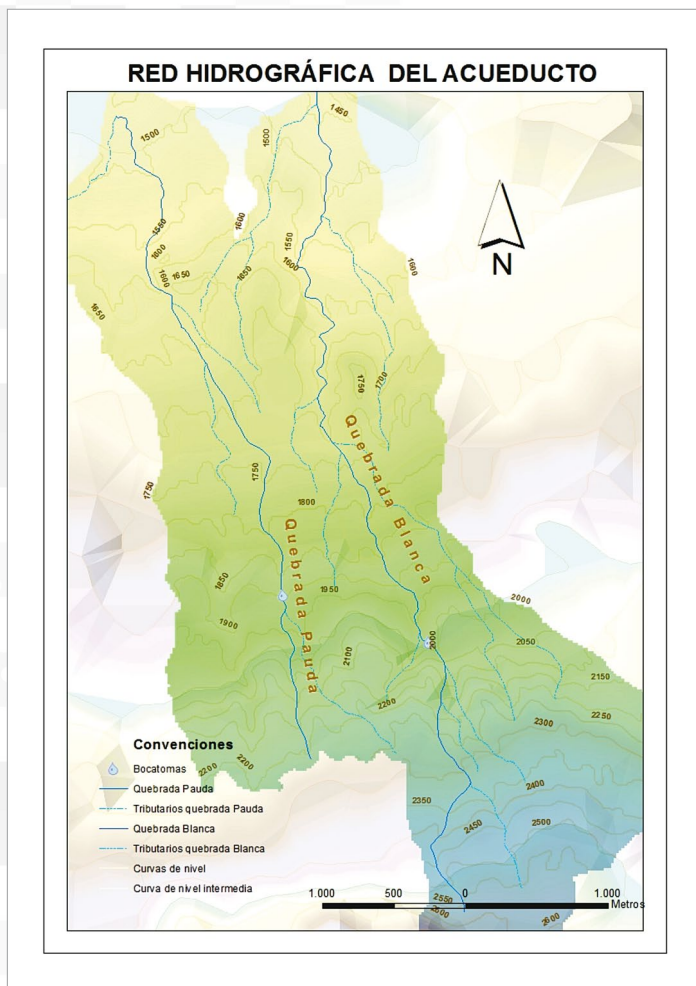


**Figura 14** Ubicación de área de estudio a nivel local.

Fuente: autoría propia, 2020.

Nota. El mapa representa las veredas que abastece el acueducto y permite ubicar las estructuras del acueducto y ver el área de influencia. Esta figura fue elaboración propia en el año 2020, con base cartográfica tomada del IGAC.

La fuente principal hídrica de abastecimiento del acueducto son las quebradas Blanca y Pauda, como se evidencia en la Figura 15:



**Figura 15** Ubicación de las fuentes hidrológicas que abastecen el acueducto.

Fuente: autoría propia, 2020.

Nota. El mapa representa las quebradas Blanca y Pauda que abastecen el acueducto.

### 3.2.2 Marco Legal

A continuación, se expone la normatividad vigente correspondiente al sector del agua potable y saneamiento básico, las cuales son necesarias tener en cuenta para la realización de esta investigación:

### 3.2.2.1 Constitución Política de Colombia

*Artículo 79:* Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano.

*Artículo 356, inciso 4:* los recursos del sistema general de participaciones de los departamentos, distritos y municipios se destinarán a la financiación de los servicios a su cargo, dándole prioridad a los servicios de salud, educación y servicios públicos domiciliarios de agua potable y saneamiento básico.

*Artículo 366:* El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, saneamiento ambiental y de agua potable.

### 3.2.2.2 Ley 09 de 1979

*Artículo 53:* Las entidades responsables de la entrega del agua potable al usuario deberán establecer: Normas de operación y mantenimiento de las obras, equipos e instalaciones auxiliares, incluyendo registros estadísticos; Normas sobre seguridad e higiene.

*Artículo 57:* Las entidades encargadas de la entrega del agua potable al usuario velarán por la conservación y control en la utilización de la fuente de abastecimiento, para evitar el crecimiento inadecuado de organismos, la presencia de 26 animales y la posible contaminación de otras causas.

*Artículo 585:* Es responsable de la calidad del agua, conforme a lo establecido en esta ley, la persona natural o jurídica que la entregue al usuario.

### 3.2.2.3 Decreto 1575 de 2007. “Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”

Hace referencia al sistema de protección y normas técnicas de calidad del agua potable. Tiene como objeto principal dar a conocer las normas físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable, teniendo en cuenta los valores permitidos de las diferentes características mencionadas anteriormente que puede contener el agua.

### 3.2.2.4 Decreto 475 de 1998 “Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable”

*Parágrafo:* “Las personas que prestan el servicio público de acueducto, bajo condiciones normales, deberán garantizar su abastecimiento en continuidad y presión en

la red de distribución, acorde con lo dispuesto en los planes de gestión y resultados (PGR), elaborados por las personas que prestan el servicio público de acueducto y aprobados por el Ministerio de Desarrollo Económico, de acuerdo con lo estipulado en la Ley 142 de 1994.”

#### *3.2.2.5 Decreto 1640 de 2012 “Reglamenta los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”*

Señala la competencia de las autoridades ambientales para hacer Evaluaciones Regionales del Agua, la competencia y procedimiento al Ministerio del Medio Ambiente para adelantar Planes Estratégicos en las áreas hidrográficas o macrocuencas, a la vez que determina las funciones de los Consejos Ambientales Regionales de Macrocuencas y los lineamientos del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico y el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Por último, establece el Plan Nacional de Microcuencas y de Acuíferos.

#### *3.2.2.6 Resolución 330 de 2017, Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*

La resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.

#### *3.2.2.7 Concesión de aguas*

El acueducto cuenta con la concesión de aguas para el uso doméstico del agua, autorizado por la autoridad ambiental (CAR); por otro lado, se rige bajo lo establecido en la Ley 388 de 1997 dando permiso de uso según lo mencionado en el Esquema de Ordenamiento (EOT) de Sasaima.

### **3.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO**

El estudio hidrológico es de gran importancia, debido a que permite conocer la geomorfología de las cuencas de estudio mediante su sistema natural de transporte de agua, en el cual se identifica el tipo de drenaje que alimenta las quebradas y así mismo su comportamiento (Benavides, 2009).

Para poder caracterizar las cuencas, inicialmente se llevó a cabo una visita de campo al acueducto, donde se identificó el área de estudio, como se muestra en la Figura



16, se tomaron las coordenadas de los puntos claves para realizar un levantamiento topográfico por el método de altimetría, ya que este facilita representar el relieve del terreno, (planos de curvas de nivel, perfiles, etc.), por medio de un teodolito marca FOIF DT 105, certificado de la Universidad Libre. Adicional a esto se niveló y realizó un chequeo general, revisando las partes mecánicas, especialmente los tres tornillos de la plataforma equilibrante, los tornillos tangenciales de movimiento horizontal y vertical y, los botones de bloqueo.



**Figura 16** Levantamiento de datos en la zona de estudio.

Fuente: autoría propia, 2017.

*Nota. La fotografía se tomó en la primera visita que se realizó al acueducto, donde se hizo el levantamiento de datos en el año 2017.*

La altimetría se realizó por medio de la nivelación simple, la cual consiste en tomar un sitio de referencia donde el teodolito permita conocer la elevación de los diferentes puntos que se buscan medir. La ubicación del BM, es decir, el banco de nivel debe ser estratégico con el fin de tener las mejores condiciones de visibilidad; puesto que es la primera medición y se hace en un lugar estable o fijo.

La medición del BM se hace con la vista de atrás o lectura de espalda para tomar la elevación del teodolito y, el resto de los puntos se hace con la vista delantera o lectura de frente, debido a que a esta altura se le resta la del instrumento y así sucesivamente, logrando hacer el trazado del relieve en el terreno. Lo anterior se hizo con el fin de obtener la información necesaria para integrar los sistemas de información geográfica especializada con la información recolectada en el software ArcGis versión 10.5.

Al obtener los datos del levantamiento topográfico y con ayuda de las planchas a una escala 1:25.000 obtenidas por medio del IGAC, se estableció el trazo de las

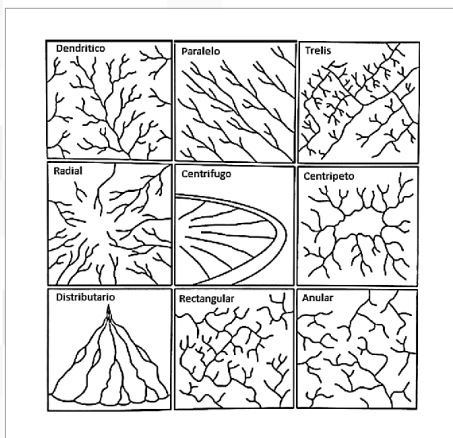
curvas de nivel en el terreno de estudio, donde permitió medir las características morfológicas tales como área, perímetro, longitud de los drenajes y tributarios, mediante la delimitación de las cuencas.

Estos parámetros se determinaron mediante el uso de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución espacial de 5 metros y la opción hidrológica en el software ArcGis. (Malik M., 2016; Rai P. K 2014).

Con el modelo mencionado anteriormente se estableció el perfil de los cauces con la herramienta de interpolación para generar una representación morfológica de la superficie. Se seleccionó los cauces y con la extensión 3D analyst, se tomó la función profile graph para generar la gráfica de los perfiles en ArcGis. Los perfiles de las quebradas permitieron observar aquellos cambios que se han ocasionado por factores externos como litología, clima, entre otros.

En cuanto al drenaje de las quebradas, se realizó de acuerdo a un orden, es decir, se destinó un valor numérico a los cursos que conforman la red, se asignó el valor de 1 a los cursos que son nacientes, un valor de 2 a la unión de dos cauces de orden 1, un valor de 3 a la unión de dos cauces de orden 2 y así sucesivamente hasta finalizar la jerarquización del drenaje.

El cauce con mayor magnitud dentro del área de la cuenca es el río o quebrada principal (Gaspari, 2013). Luego de darle un orden a la red, se procedió a identificar el patrón de drenaje en relación con la evolución que ha tenido la cuenca, esta se clasifica de acuerdo con la forma, como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17** Caracterización de los patrones de drenajes de los patrones de drenajes.

Fuente: adaptado del 35vo Simposio en Geomorfología expuesto por Campbell en el 2004.

Nota. La figura ilustra la forma que pueden presentar los diferentes drenajes de acuerdo con su geomorfología.

La densidad de drenaje permite relacionar cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca y la clase de material predominante de la zona (Gaspari, 2013). Para el área de estudio se aplicó la Ecuación 3:

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Ecuación (3) *Densidad de drenaje*

Donde:

$Dd$  = Densidad de drenaje;  $Lt$  = Longitud total;  $A$  = Área de la cuenca.

El factor de forma indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca hidrográfica. Se expresa como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud axial (Gaspari, 2013). Para interpretar el resultado se categorizó por medio de valores interpretativos, como se muestra en la Tabla 23:

**Tabla 23** *Valores interpretativos de la densidad de drenaje*

Densidad de drenaje (Km/km <sup>2</sup> )	Categoría
<1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy alta

Fuente: adaptada de “Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas en escenarios de riesgo por crecidas” (p. 18), por A. Delgado, C. Ferrer, M. Dugarte, 2015, *Revista Geográfica Venezolana*, 56(1).

La clasificación permite interpretarse en mapas a escala 1:25.000. Esta categoría relaciona la densidad de drenaje con la escorrentía. Posterior a esto se calculó el factor de forma el cual es adimensional como se muestra en la Ecuación 4:

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación (4) *Factor de Forma Kf*

Donde:

$Kf$  = Factor de forma;  $L$  = Longitud del cauce;  $A$  = Área de la cuenca.

Tras realizar el cálculo del factor de forma, se pudo interpretar el valor, tal como se muestra en la Tabla 24.

**Tabla 24** Valores interpretativos del factor de forma.

Valores aproximados	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,30 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada, ni achatada
0,45 - 0,60	Ligeramente achatada
0,60 - 0,80	Achatada
0,80 - 1,20	Muy achatada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: Adaptada de la *Caracterización y análisis multidisciplinario de la información hidrológicas en cuencas* (p. 22), por C. Brieva, 2018, INTA.

Nota. En la tabla 24 se muestra de manera cualitativa el factor de forma, según el valor obtenido tras realizar el cálculo correspondiente.

El índice de compacidad es la relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo teórico que representa un límite, el cual define la forma y superficie equivalente a la cuenca (Gaspari, 2013). Este índice permite analizar la influencia de los escurrimientos y el camino que se forma como consecuencia de las precipitaciones. Se calculó mediante la Ecuación 5:

$$K_c = 0,28 \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right)$$

Ecuación (5) Factor de compacidad  $K_c$

Donde:

$K_c$  = Factor de compacidad;  $P$  = Perímetro;  $\sqrt{A}$  = Área de la cuenca.

A medida que el  $K_c$  tiende a 1, es decir, cuando la cuenca tiende a ser redonda tiene una gran probabilidad de presentar grandes crecientes. Cuando  $K_c$  es 1.25 es oval redonda y cuando es igual o mayor a 1.75 es una cuenca rectangular - oblonga la cual tiene tendencia a ser irregular.

Después de hallar el índice de compacidad, se procedió a determinar el tiempo de concentración que se define como el tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida (Lux Cardona, 2016) y se calcula mediante la Ecuación 6:

$$T_c = 0,06628 \left( \frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77}$$

Ecuación (6) Tiempo de concentración  $T_c$

Donde:

$T_c$ : Tiempo de concentración ( $h$ );  $L$ : Longitud de la cuenca (Km);  $S$ : Pendiente del cauce.

En cuanto a los parámetros de relieve, se complementan mediante el levantamiento topográfico y la información geográfica obtenida de un shapefile del IGAC con el software ArcGis versión 10,5.

Se tomó el MED mencionado anteriormente, el cual se interpoló mediante la función Slope del software, donde se calculó la tasa máxima de cambio de elevación sobre la distancia en la cual se determina el descenso cuesta abajo más empinado (Neri, A. y Sarcinella, M., 2019), teniendo como resultado un ráster de pendientes con un rango que se clasificó como se ve en la Tabla 25:

**Tabla 25** Clases de pendientes según el IGAC.

Clase simple	Porcentaje
Ligeramente quebrada	7 - 12
Fuertemente ondulada	12 - 25
Moderadamente quebrada	12 - 25
Ligeramente escarpada	25 - 50
Moderadamente escarpada o muy empinada	50 - 75
Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	> 75

Fuente: <http://igacnet2.igac.gov.co/>

*Nota. Adaptada de la Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso, por el Instituto Nacional Geográfico Agustín Codazzi, 2014.*

En la Tabla 25 se clasifican las pendientes por lo general en un área determinada no solo se presentan de manera simple, sino en combinación de pendientes, de acuerdo con la morfología del terreno.

Posteriormente, se determinó la pendiente media de la cuenca por medio del método de Alvord, el cual consiste en dividir la cuenca en franjas con relación a su altura, obteniendo así la pendiente media, en donde se pondera la pendiente hallada para cada franja en función del área.

En cuanto a la elevación media, la cual permite caracterizar las zonas climáticas y ecológicas, se representa mediante la curva hipsométrica, por medio de un porcentaje de área acumulada que es igualado o excedido a una determinada cota.

### 3.3.1 Comportamiento de la precipitación y el caudal en el área de estudio

Inicialmente, se tomó información de las estaciones meteorológicas e hidrológicas de la Autoridad Ambiental Regional (CAR). Para la ubicación del área de estudio se consultó la información de las estaciones El Acomodo, Venecia, la Tribuna, y El Tesoro durante los años 2008 hasta el 2018, donde se tomaron los datos de temperatura, caudales máximos, medios y mínimos para determinar la curva de duración de caudales y la curva de intensidad duración y frecuencia.

La curva de duración de caudales (CDC), representa la relación entre la magnitud y la frecuencia de los caudales medios mensuales durante el año 2018 permitiendo hacer estimaciones del porcentaje de tiempo en el cual el caudal es igualado o excedido en el periodo de tiempo registrado. Se obtuvo la CDC organizando los datos de caudal de mayor a menor y se asignó a cada valor la probabilidad de excedencia con la función de Weibull. (Gallego, A. y Carvajal, F., 2017). Se graficó el caudal versus la probabilidad con base en la Ecuación 7:

$$FE_{(x)} = \frac{m}{N + 1}$$

Ecuación (7) Probabilidad de excedencia

Donde:

$FE_{(x)}$  = Probabilidad de excedencia del valor del caudal;  $m$  = Posición en la columna ordenada de mayor a menor el valor del caudal;  $N$  = Número total de datos.

Así mismo se determinó la frecuencia de ocurrencia de los caudales mínimos y máximos.

La curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF) representa la intensidad de lluvia fuerte en milímetros por hora para una duración de 30, 60, 90, 120 o 360 minutos y que tiene una probabilidad de ocurrencia expresada en un periodo de retorno usualmente en años.

Para determinar la curva IDF, se divide a Colombia en 4 regiones debido a que no se tiene la información de los registros de lluvia con más intensidad (Invias, 2009). La intensidad se expresa en la Ecuación 8:

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Ecuación (8) Intensidad

Donde:

$I$  = Intensidad;  $T$  = Periodo de retorno en años;  $M$  = Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual;  $t$  = Duración de la lluvia, en minutos (min);  $a, b, c, d$  = Parámetros de ajuste de la regresión.

Estos parámetros fueron regionalizados por el Instituto Nacional de Vías como se presenta en la Tabla 26.

**Tabla 26** Valores de los coeficientes  $a, b, c$  y  $d$  para el cálculo de las curvas intensidad, duración, frecuencia, IDF, para Colombia.

Región	A	B	C	d
Andina (R1)	0,94	0,18	0,66	0,83
Caribe (R2)	24,85	0,22	0,50	0,10
Pacífico (R3)	13,92	0,19	0,58	0,20
Orinoquía (R4)	5,53	0,17	0,63	0,42

Fuente: <https://www.invias.gov.co>

Nota. Adaptada del Manual de drenaje para carreteras, (p 2-71), por INVIAS, 2009. Para la zona de estudio como se muestra en la tabla 26 la región que se tomó para sacar la curva IDF fue la Andina (R1).

La precipitación media de la cuenca es de gran importancia puesto que la altura de precipitación que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores. Para calcular la precipitación se tomaron los datos de las estaciones La Tribuna, El Acomodo, Agua Fría y Argentina. Se calculó por tres métodos diferentes, el primero fue por el promedio aritmético, el cual consistió en hacer la suma de los datos registrados por cada estación durante el año 2018 y se dividió por el número total de estaciones, este método se logró realizar debido a que la mayoría de datos tienen similitud entre sí.

El segundo método es el de las isoyetas, donde se tomó las curvas de nivel y con ayuda del software ArcGis se interpoló la altura en la que se encuentran las estaciones meteorológicas para aproximar los valores medios de la precipitación y se calculó con la Ecuación 9:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{P_i P_{i+1}}{2} \right) A_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^{i=n-1} A_{i,i+1}}$$

Ecuación (9) Precipitación promedio de la cuenca

Donde:

$\bar{P}$  = Precipitación promedio de la cuenca (mm);  $A_i$  = Área entre cada dos isoyetas (Km<sup>2</sup>);  $P_i$  = Precipitación puntual en la estación  $i$  (mm).

El siguiente método es conocido como polígonos de Thiessen, en este método se tomaron las estaciones que están dentro del área de estudio y sus alrededores sacando el promedio anual de lluvia. Posterior a eso, se unió cada estación dibujando triángulos donde se trazaron mediatrices formando polígonos. Se midió el área de cada polígono para luego aplicar la Ecuación 10:

$$P_m = \frac{\sum P_i * S_i}{S_i}$$

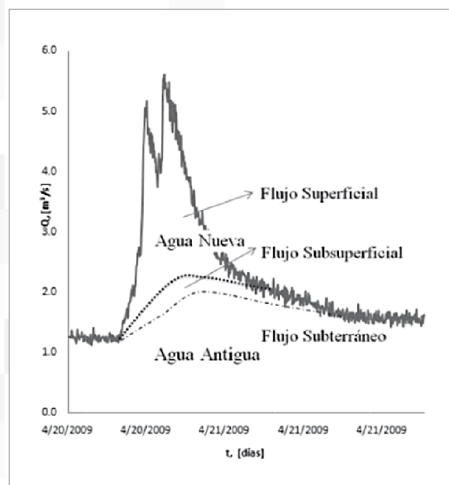
Ecuación (10) *Precipitación promedio de la cuenca*

Donde:

$P_m$  = Precipitación promedio de la cuenca (mm);  $P_i$  = Precipitación de la estación en la zona  $i$ ;  $S_i$  = Área del polígono dentro de la zona de estudio  $i$ .

Para saber la oferta que presentan las quebradas, se realizó el balance hídrico. Inicialmente, se tomó los datos de precipitación y temperatura durante el año 2018 de la estación La Tribuna.

Se realizó un hidrograma para hacer un estimado del porcentaje de aguas subterráneas que pueden presentar las quebradas en relación del flujo superficial, también se determinó la escorrentía superficial total por el método de separación de componentes de la línea recta el cual consiste en unir con una línea recta el inicio de la curva de concentración (A) y el comienzo de la curva de agotamiento como se evidencia en la Figura 18:



**Figura 18** *Esquema de separación del hidrograma.*

Fuente: Adaptada de *Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija* (p. 43), por S. Gómez, J. Guzmán, 2011, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, No. 6.



El método que se empleó para realizar el hidrograma al no tener todos los datos del caudal diario se planteó el modelo del *Soil Conservation Service* (Vargas G., Torres G. y Carrillo S., 2109). Estableciendo un hidrograma adimensional a partir del tiempo de concentración con base a un pico de tiempo y caudal. A continuación, se describe el método:

Inicialmente, se calcula el tiempo de retardo ( $T_r$ ) el cual es el tiempo que tarde en caer la primera gota de lluvia:

$$T_r = 0,6T_c$$

Ecuación (11) *Tiempo de concentración  $T_c$*

Donde:

$T_c$  =Tiempo de concentración.

Posterior a esto se determina la duración de la lluvia ( $d_e$ ) con la Ecuación 12

$$d_e = 2\sqrt{T_c}$$

Ecuación (12) *Tiempo de retardo  $T_p$*

Teniendo el tiempo de retardo ( $T_p$ ) se calculó el tiempo en el que ocurrirá el pico con el caudal máximo. Se calcula mediante la Ecuación 13:

$$T_p = \frac{d_e}{2} + T_r$$

Ecuación (13) *Tiempo pico*

Luego se calculó el tiempo base, el cual es el momento en que el escurrimiento directo se ha terminado, es decir, que la lluvia, la intercepción de la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento han caído en su totalidad sobre la cuenca y se calculó con la Ecuación 14:

$$T_b = \frac{8}{3}T_p$$

Ecuación (14) *Tiempo base*

Finalmente, se determinó el pico del caudal o el caudal máximo como se expresa en la Ecuación 15:

$$Q_p = 0,208 \frac{A_c}{T_p}$$

Ecuación (15) *Caudal máximo*

Donde:

$Q_p$  = Caudal pico;  $A_c$  = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>);  $T_p$  = Tiempo pico (horas).

El balance se calculó por el método de Thornthwaite, donde se obtiene el índice calor mensual ( $i$ ), con la Ecuación 16:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Ecuación (16) *Índice de calor mensual*

Donde:

$i$  = Índice de calor mensual;  $t$  = Temperatura media mensual durante el año 2018.

Se determinó el calor anual sumando todos los calores durante el año 2018. Posteriormente, se determinó la evapotranspiración teniendo en cuenta la cobertura vegetal, que incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación de agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas, lo anterior, se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$ETP_{(Sin\ corregir)} = 16 \left(\frac{10*t}{I}\right)^a$$

Ecuación (17) *Evapotranspiración potencial sin corregir*

Donde:

$ETP_{(Sin\ corregir)}$  = Evapotranspiración potencial a nivel mensual en mm/mes, para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas) promedio de la cuenca (mm);  $T$  = Temperatura media mensual °C;  $I$  = Índice de calor anual;  $a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0,49239$

Es necesario hacer la corrección de la evapotranspiración para el número de días del mes y el número de horas de sol, mediante la Ecuación 18:

$$ETP = ETP_{(Sin\ corregir)} * \frac{N}{12} * \frac{a}{30}$$

(18) *Evapotranspiración potencial corregida*

Donde:

$ETP$ : Evapotranspiración corregida;  $N$ : Número máximo de horas de sol dependiendo del mes y la latitud (para la zona y la estación de referencia se tomó una latitud de 4, 51° N);  $D$ : Número de días de cada mes.

Posterior a esto, se hace la diferencia entre la precipitación de cada mes y la ETP corregida con el fin de determinar la capacidad de almacenamiento de la cuenca. Por otro lado, se determinó el déficit y excesos para luego calcular la evapotranspiración real de la zona.

Finalmente, se hace el balance de las entradas y salidas en el ciclo hidrológico para la zona de estudio:

$$\text{Evapotranspiración} + \text{Exceso} = \text{Precipitación} + \text{Deficit}$$

Ecuación (19) Balance de entradas y salidas

### 3.3.2 Estudio hidrológico de las fuentes de abastecimiento: PAUDA y BLANCA

Las características morfológicas de la cuenca obtenidas con SIG se presentan en la Tabla 27 y en la Figura 19; se trazó en el software el perfil de las cuencas. Se halló el área y el perímetro y el factor de forma, el cual está relacionado con la geología del terreno, es decir, que es el encargado de moldear la fisiografía y la forma que tienen las quebradas, para este caso son alargadas.

El factor de compacidad indica que son rectangular oblonga, con un patrón de drenaje paralelo permitiendo ver piedemontes y laderas en la zona de estudio. Al tener baja densidad de drenaje la quebrada Pauda es poco drenada y puede reflejar resistencia de las rocas a la erosión, coberturas vegetales muy espesas y pendientes poco pronunciadas, sin embargo, la quebrada Blanca presenta una alta densidad lo que podría decir que tiende a tener ocurrencia de grandes crecientes debido a que presenta suelos pocos profundos con baja permeabilidad.

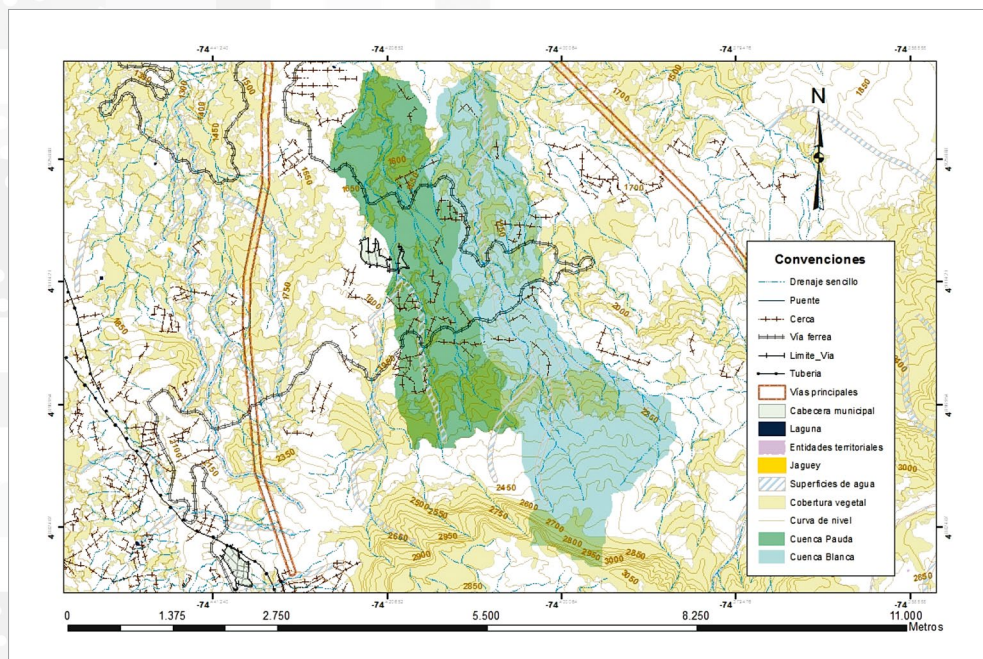
Por otro lado, el tiempo de concentración promedio que tarda en caer la primera gota de lluvia desde el nacimiento del cauce hasta su desembocadura es respectivamente para la quebrada Blanca 123,6 minutos y para la quebrada Pauda un promedio de 48,50 minutos. Por lo tanto, representa el tiempo de equilibrio o duración necesario para que la intensidad de escorrentía alcance el caudal máximo.

**Tabla 27** Características morfométricas de las cuencas.

Parámetro	Quebrada Blanca	Quebrada Pauda	Unidad
Área	6,77	5,22	Km <sup>2</sup>
Perímetro	16,3	13,5	km
Longitud Quebrada	0,67	0,52	km
Longitud tributarios	0,99	0,47	Km
Facto de forma Kf	0,31	0,45	-
Índice de compacidad Kc	1,77	1,67	km
Patrón de drenaje	Paralelo	Paralelo	-
Orden de los cauces	2	1	-
Densidad de drenaje	3,2	0,19	-
Tiempo de concentración promedio	123,6	48,50	Minuto

Fuente: elaboración propia, 2017.

Nota. En la tabla se describen las características físicas de las cuencas analizadas en el software ArcGis para cada quebrada. Con los datos tomados en la primera visita se extraen las curvas de nivel en el software, donde se realizó el plano topográfico de la zona.

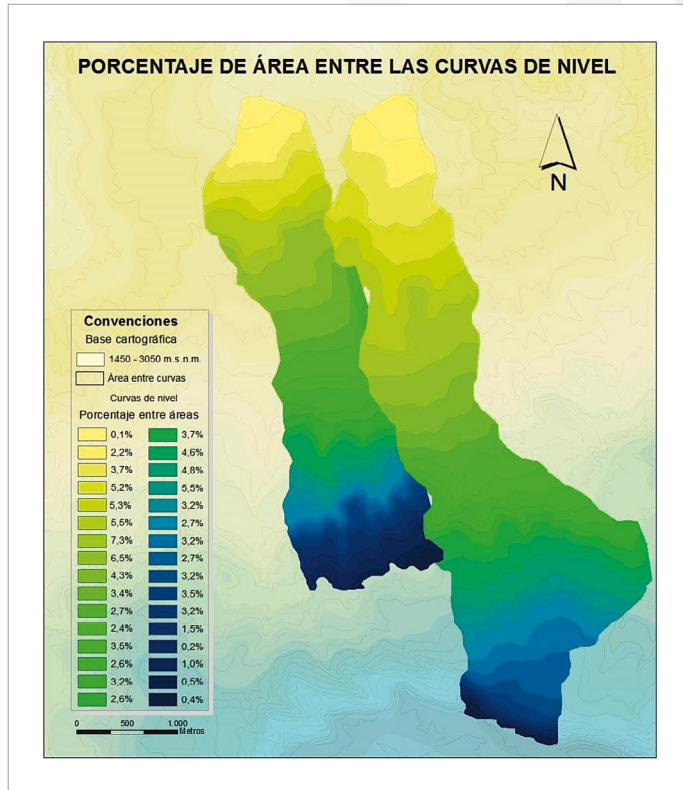


**Figura 19** Plano topográfico del área de estudio.

Fuente: autoría propia.

Nota. El plano representa las curvas nivel que oscilan en 1400 y 3000 m.s.n.m. permitiendo conocer el clima, los desniveles, las pendientes y las zonas de drenajes.

Con base al Figura 19, se midió el área entre curvas donde se sacó el porcentaje acumulado de área dependiendo a la altura en la que se encuentra, para finalmente elaborar la curva hipsométrica. En la Figura 20 se representa el porcentaje de área por cada curva.



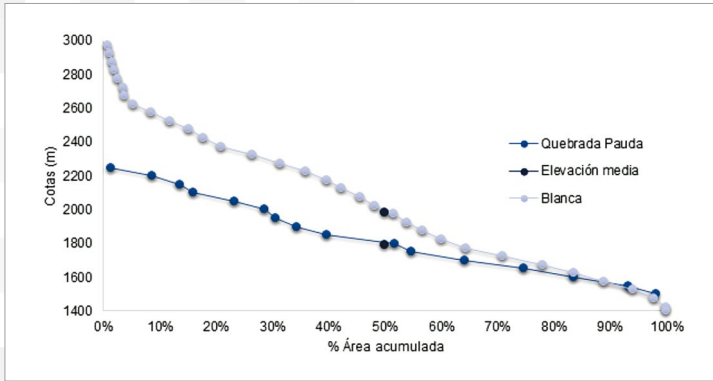
**Figura 20** Porcentaje de área entre las curvas de nivel para la curva hipsométrica.

Fuente: autoría propia.

*Nota.* La figura representa el porcentaje de áreas de acuerdo con un color establecido indicando que la mayor área de curvas se encuentra entre los 1800 y 2400 m.s.n.m.

Teniendo en cuenta las cotas del perfil y el área acumulada entre las curvas de nivel, se realizó la curva hipsométrica, como se muestra en la Figura 21 que la cuenca Blanca está en una fase de equilibrio (Martínez, H., 2018) señalando que la cuenca está en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos mientras que la quebrada Pauda se encuentra en una fase juvenil donde se pueden apreciar índices de erosión o movimiento de tierras. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se puede asociar que la quebrada Pauda por su topografía no es conveniente instalar una bocatoma de fondo debido a que la zona es inestable. Por otro lado, la elevación media de cada cuenca se encuentra entre 1790 y 1985 m.s.n.m indicando un clima templado típico de

un bosque muy húmedo premontaño y es común que para la zona alta tienda a llover más, esto permite deducir que la evapotranspiración es excedida por la lluvia dando un índice de un buen sobrante de agua en el suelo.

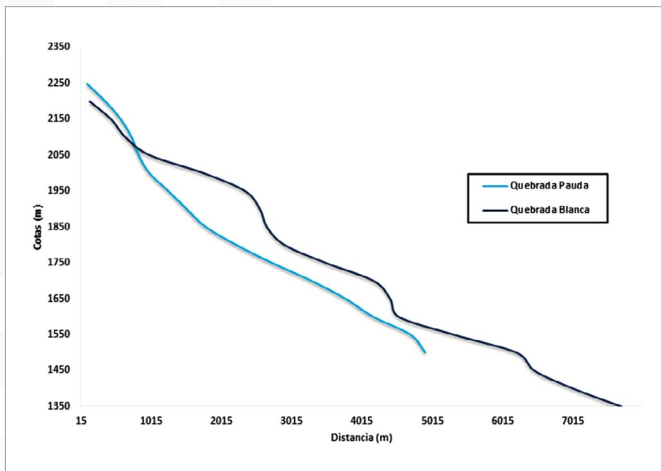


**Figura 21** Curva hipsométrica de las quebradas de estudio.

Fuente: autoría propia.

Nota. La figura representa la curva que se forma de acuerdo con el porcentaje de áreas versus la altura, indicando mayores porcentajes de áreas entre curvas hacia las zonas altas de las quebradas.

Las curvas de nivel del levantamiento topográfico y las distancias medidas en campo, permiten trazar el perfil de las quebradas como se muestra en la Figura 22, identificando las zonas altas, bajas, con irregularidades y zonas de fallas del terreno en donde se encuentran los cauces.



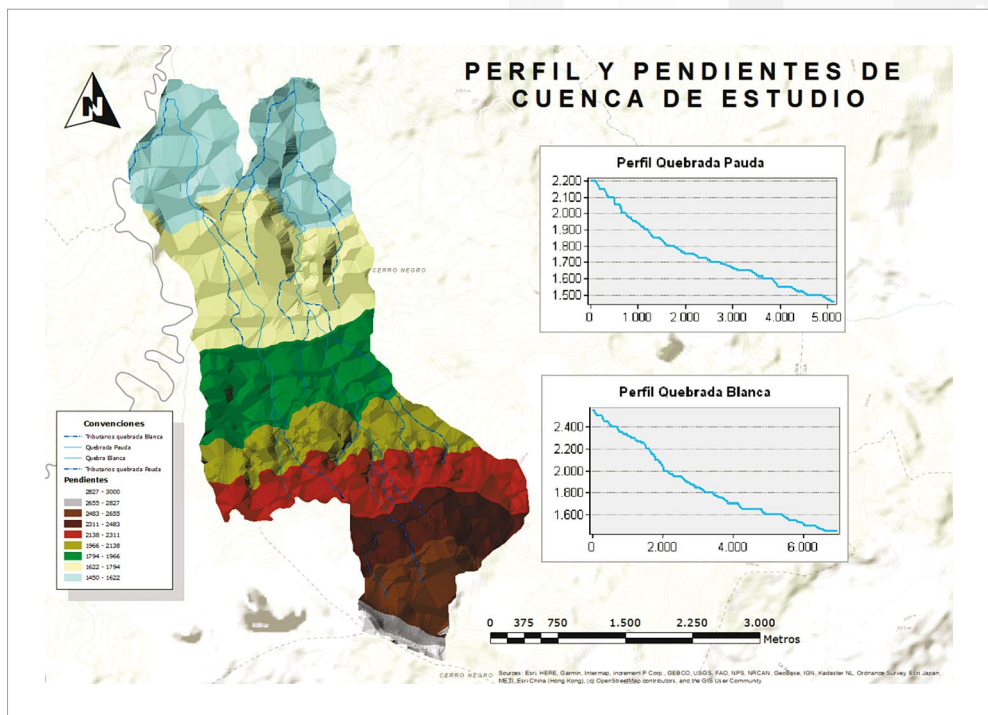
**Figura 22** Perfil de quebradas Blanca y Pauda.

Fuente: autoría propia.

Nota. Se toman las cotas versus las distancias medidas en el terreno donde se encuentran las quebradas para formar el perfil de cada quebrada.

De acuerdo con la forma de los perfiles para la quebrada Pauda tiende a ser cóncavo, mientras que el perfil de la quebrada Blanca tiende a ser cóncavo – convexo, esto tiene una relación directa con la sedimentación y el material de arrastre que transporta generando la erosión en determinados tramos del perfil.

En el software de ArcGis con el plano topográfico y el perfil de las quebradas, se utilizó la herramienta de interpolación TIN para hacer una representación del relieve de la superficie. La función interpoló una red de triángulos irregulares que permitió hacer los cálculos de área planimétrica, de superficie y de volumen como se muestra en la Figura 23.

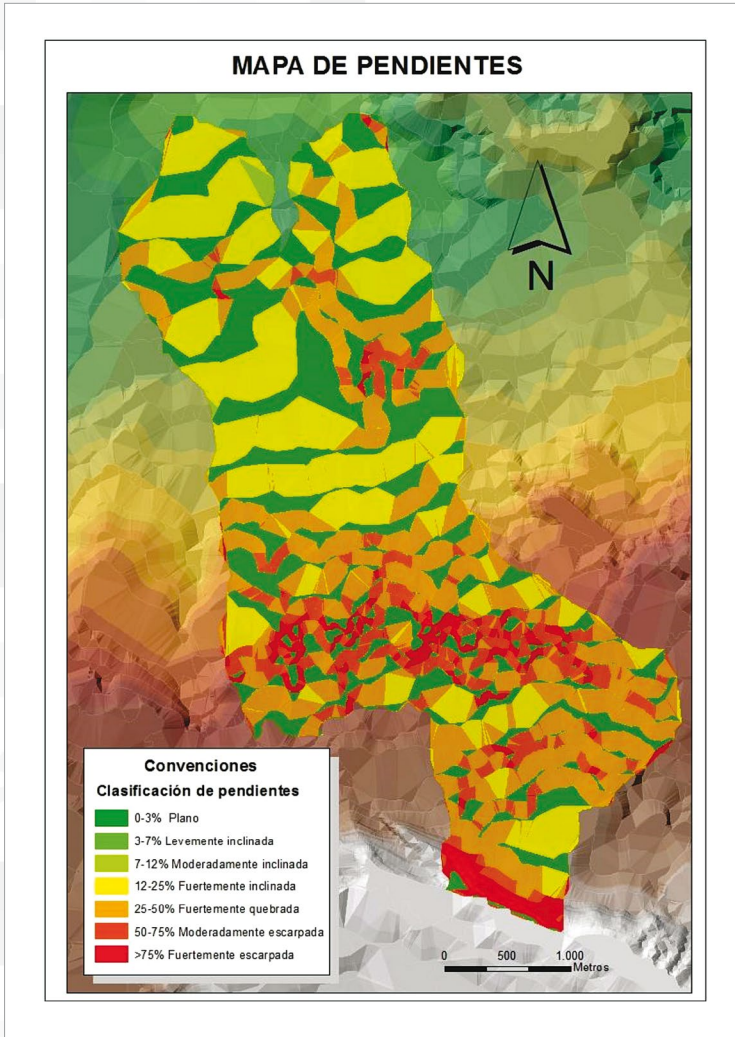


**Figura 23** Perfil de quebradas en el software de ArcGis.

Fuente: autoría propia.

Nota. La figura representa los puntos más bajos y altos por medio de un análisis de triangulación más exacta logrando determinar los perfiles de las quebradas.

Posterior a esto se realizó un modelo de elevación digital como se muestra en la Figura 24, indicando en porcentajes los desniveles más marcados. La zona de estudio tiene pendientes planas hasta pendientes moderadamente escarpadas. Esto permite identificar si en la zona las quebradas van a tener grandes o pequeñas crecientes, puesto que entre más inclinada sea la pendiente mayor será el transporte de material.



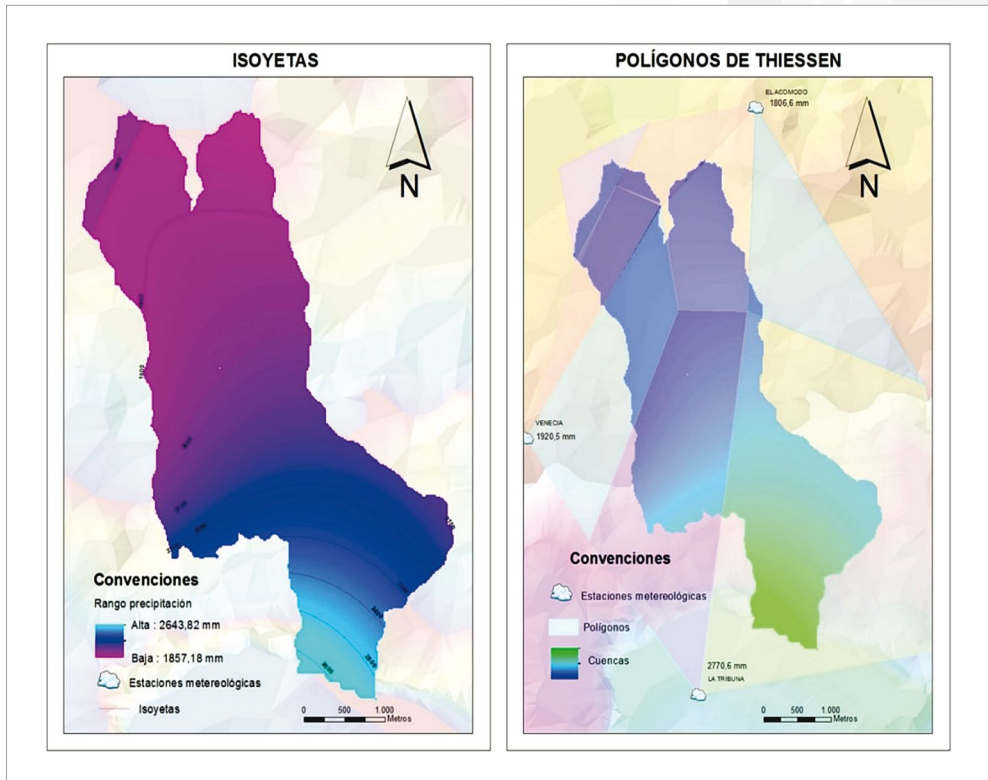
**Figura 24** Porcentaje de pendientes clasificadas por el IDEAM.

Fuente: autoría propia.

*Nota. La figura evidencia el porcentaje de pendientes indicando mayor área entre las pendientes del 7% al 25%, es decir, que la zona de estudio tiende a tener pendientes levemente inclinadas a fuertemente inclinadas.*

Se determinó la precipitación media, debido a que las dimensiones de la cuenca pueden ser cambiantes por lo tanto las precipitaciones varían en tiempo y espacio de acuerdo a cada zona, por esto se tomó los datos registrados en las estaciones pluviométricas de la Corporación Autónoma Regional (CAR) las cuales son: La Tribuna, El Acomodo, Venecia y El Tesoro para calcular la precipitación media por el método de Isoyetas y de los polígonos de Thiessen, indicando un promedio de 2254,6 mm anuales, como se muestra en el Figura 25.





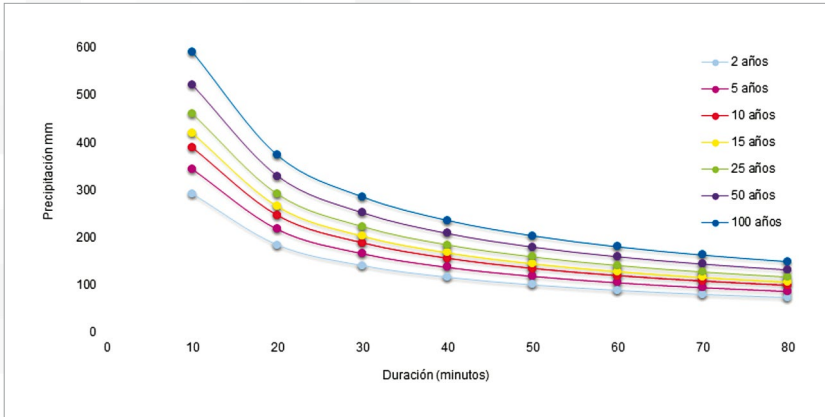
**Figura 25** Precipitaciones medias de la zona de estudio.

Fuente: autoría propia.

*Nota.* En la figura se establecen los dos métodos para calcular las precipitaciones medias. Los colores en el método de isoyetas indican el nivel de lluvia desde el más alto al más bajo. En el método de Thiessen se toman las estaciones hidrometeorológicas más cercanas y se trazan los polígonos determinando por áreas el promedio.

Posterior a esto, se calculó la curva de intensidad, duración y frecuencia, evaluando el comportamiento de las quebradas para los próximos 100 años, como se evidencia en la Figura 26. La curva permite representar la intensidad de la lluvia en (mm) por la duración en minutos, con la probabilidad de ocurrencia de acuerdo al periodo de retorno (Ganora D., 2009), es decir, que para el tiempo estimado de diseño de la obra hidráulica la probabilidad de ocurrencia de una precipitación promedio de 460 mm se dará cada 25 años.

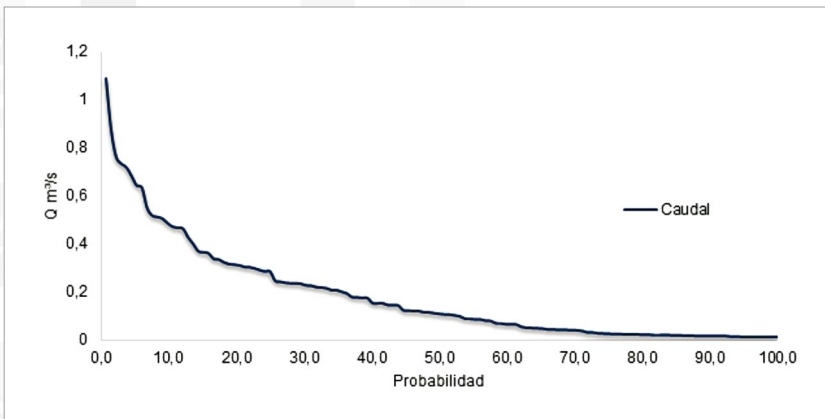
Por otro lado, la curva de duración de caudales indicó el porcentaje de tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos, para la zona de estudio la pendiente pronunciada en el inicio del tramo representado en el gráfico de la Figura 27, indica caudales altos durante periodos de tiempo cortos, también permitió conocer el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia.



**Figura 26** Curva de intensidad, duración y frecuencia para el año 2018.

Fuente: autoría propia, 2018.

Nota. La curva de intensidad, duración y frecuencia se determina con las precipitaciones de determinado año para un periodo de retorno en años y su tiempo de duración, es decir, que para 25 años la mayor precipitación será un promedio de 460 mm durante 10 minutos.



**Figura 27** Diagrama de la curva de duración de caudales.

Fuente: autoría propia, 2008 a 2018,

Nota. En la figura se representa la frecuencia de ocurrencia de caudales con datos tomados durante el periodo del 2008 hasta el 2018 de la estación hidrometeorológica La Tribuna.

La curva de duración, se puede considerar representativa del régimen de caudales medios de las quebradas, por lo tanto, es posible usarse para pronosticar el comportamiento del régimen futuro de caudales. El caudal de 0,106 m³/s será el caudal base para el diseño de las bocatomas, debido a que hay un 50% de probabilidad de que este caudal se exceda y no afecte la operación de la bocatoma.

El caudal probable mínimo registrado en la estación es de 0,009 m<sup>3</sup>/s, este es el caudal que las corrientes pueden suministrar durante todo un año con una probabilidad de excedencia del 100%, es decir, si este caudal es mayor que la demanda, las fuentes tienen la capacidad de abastecer dicha demanda sin necesidad de almacenamiento.

Para evaluar la oferta de las quebradas de acuerdo con toda la información mencionada anteriormente, se realizó el balance hídrico, ya que es una herramienta que permite conocer las características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa, pues cualquier diferencia en la entrada y salida se deben reflejar en un cambio en el almacenamiento del agua dentro del área.

En la tabla 28 se exponen los resultados del proceso para calcular el balance hídrico y en la tabla 29 se calculó el balance.

**Tabla 28** Proceso para la elaboración del balance hídrico.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
PROM (t)	21,4	21,3	21,4	21,3	21,5	21,4	21,5	21,8	21,7	21,3	21,1	21,1	21,4
Precip. mm	107,9	141,7	103,1	156,9	126,8	196,4	129,4	106,2	81,8	114,3	182,11	208,2	1654,8
i	9,0	9,0	9,0	9,0	9,1	9,0	9,1	9,3	9,2	9,0	8,8	8,8	108,3
a	2,38												
Ej	81,1	80,2	81,1	79,9	81,6	80,7	81,9	85,1	83,7	80,2	78,1	78,1	971,9
Factor corrección	0,67	0,70	0,92	1,06	1,26	1,34	1,40	1,31	1,11	0,98	0,78	0,69	
Ej corregido	54,3	56,0	74,4	84,6	102,6	108,1	114,5	111,1	92,8	78,2	61,1	53,7	991,4
Balance Hídrico													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Precip. Pm	107,9	141,7	103,1	156,9	126,8	196,4	129,4	106,2	81,8	114,3	182,1	208,2	1654,8
ETP corregido	54,3	56,0	74,4	84,6	102,6	108,1	114,5	111,1	92,8	78,2	61,1	53,7	991,4
Δ	53,6	85,7	28,7	72,3	24,2	88,3	14,9	-4,9	-110	36,1	121,0	154,5	
Varia alm (Alm)	100	100	100	100	100	100	100	95,1	84,1	100	100	100	
Deficit													0,0
Exceso	53,6	85,7	28,7	72,3	24,2	88,3	14,9	0	0	20,2	121,0	154,5	663,5
Δ Alm	0	0	0	0	0	0	0	-4,9	11,0	15,9	0	0	
ETR (mm)	54,3	56,0	74,4	84,6	102,6	196,4	129,4	111,1	92,8	78,2	61,1	53,7	1094,6

Fuente: autoría propia.

Nota: En la tabla se tomó la información de la estación La Tribuna para elaborar el balance hídrico.

**Tabla 29** Ecuación del balance hídrico para la zona de estudio.

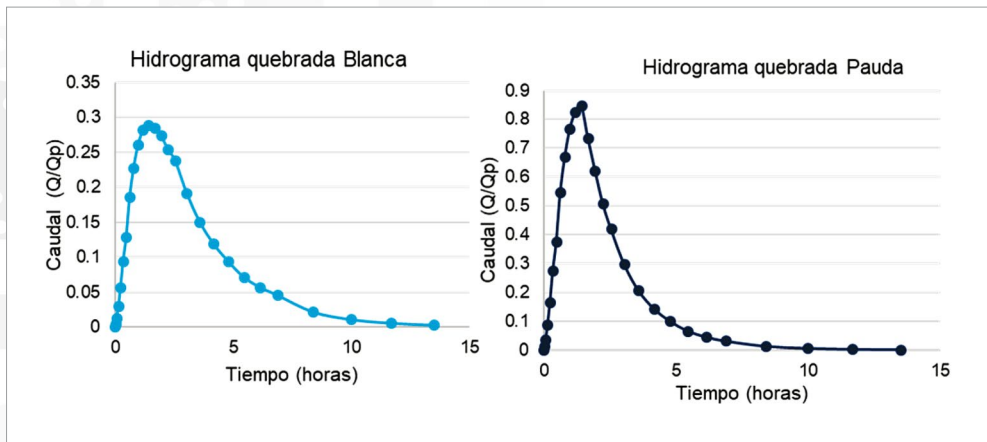
ETP + EXC = P + DEF			
ETP	+	EXC	P
991,4	+	663,5	1654,8
		=	1654,8

Fuente: autoría propia.

Nota. En la tabla 29 se hace un resumen del balance donde: ETP es la evapotranspiración que es determinada de acuerdo con la vegetación y región de la zona; EXC es el exceso de lluvia. La P es la precipitación total de la cuenca y DEF es el déficit hídrico, es decir, cuando la cuenca no tiene suficiente almacenamiento de agua debido a la diferencia de la evapotranspiración potencial y la real.

A partir del hidrograma se calculó el caudal máximo, el cual es de 0,600 m<sup>3</sup>/s para la quebrada Blanca y para la quebrada Pauda es de 0,919 m<sup>3</sup>/s. Como se ha venido evidenciando la quebrada Pauda tiene una fisiografía con tendencia a erosionarse debido a la litología que presenta, por lo tanto, se puede decir que la precipitación en esta zona es mucho más alta que en la quebrada Blanca.

De acuerdo con la forma de las curvas, la quebrada Blanca tiende a tener un suelo permeable lo que hace que su porcentaje de agua subsuperficial sea menor al de la quebrada Pauda.



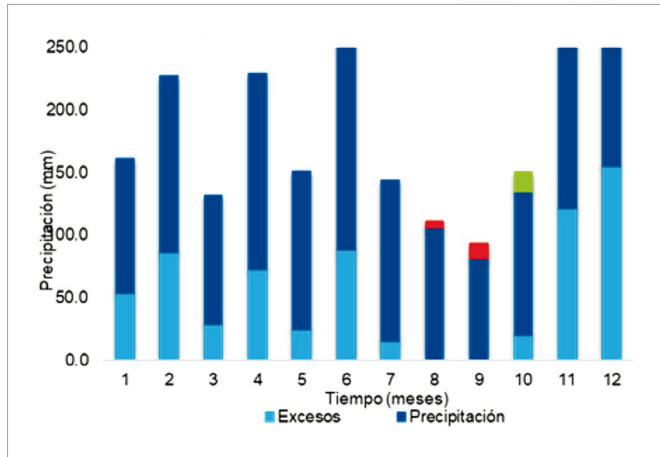
**Figura 28** Hidrogramas de las quebradas.

Fuente: autoría propia.

Nota. En esta figura se realizaron los hidrogramas a partir del método unitario. Se representa la precipitación en relación con un milímetro.

En la Figura 29 se puede evidenciar que en la zona de estudio hay dos temporadas, una temporada mojada o de lluvia durante 8 meses y una temporada seca durante 4 meses, debido a que la reserva de agua que hay para esta época se

pierde por la escorrentía superficial o se infiltra en el suelo lo que se puede decir que el régimen de la zona es bimodal.



**Figura 29** Diagrama de barras del balance hídrico.

Fuente: autoría propia.

*Nota. En el diagrama se traza los excesos, la precipitación, la utilización y la recuperación de la cuenca durante un año. Como se ve en el mes 8 y 9 tiene que utilizar agua debido a que la precipitación en esos meses no alcanza el nivel para balancear la evapotranspiración y no generar pérdidas, por lo tanto, en el mes 10 tiene que recuperarse en su almacenamiento.*

### 3.4 CALIDAD DE AGUA DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

En la segunda fase, se calculó la calidad del agua de las quebradas Blanca y Pauda, por medio del Índice de Calidad de Agua (ICA), este índice es una herramienta que permite identificar la calidad de agua de un cuerpo superficial o subterráneo en un tiempo determinado, por medio de una ecuación matemática, mediante la cual evalúa el estado de un cuerpo de agua. (López E.A., y Rodríguez C.A., 2017).

El ICA se puede calcular con diferentes conjuntos de variables, cuya cantidad y tipo depende de la disponibilidad de datos, de las diferentes presiones contaminantes a las cuales están sometidos los diferentes cuerpos de agua y del tipo de cuerpo de agua. Para el caso colombiano, se ha medido desde 2005, en las corrientes superficiales, un conjunto de cinco variables, estas son: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y pH total (IDEAM, 2013).

Esta fase se desarrolló mediante tres visitas, en las cuales se tomaron muestras en puntos que ofrecían facilidad de acceso, seguridad y eran representativos, pues el flujo de agua era permanente.

La toma de muestras se realizó siguiendo un protocolo expuesto por el IDEAM, con el fin de tener una muestra representativa y de calidad, siguiendo a detalle los requerimientos, cuidados e instrucciones que se deben tener en cuenta. (IDEAM, 2017) Las variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto fueron establecidas in situ por medio de un multiparámetro HANNA HI9829 previamente calibrado.

En el laboratorio de la Universidad Libre se emplearon los métodos descritos por el Standard Methods (APHA, WWA & WEF, 2017) para sólidos suspendidos totales (2540D) y para DQO (5220B). En la tabla 30, se presenta la definición de los cinco parámetros que se tuvo en cuenta para el cálculo del ICA, adicional a esto, se encuentra la técnica que se usó en cada uno, junto con el procedimiento que se realizó para la expresión de resultados, para finalmente, obtener los subíndices de calidad.

**Tabla 30** Procedimiento para la obtención de los subíndices de calidad.

Parámetro	Definición	Técnica de Análisis	Expresión de Resultados	Subíndice de Calidad
Oxígeno disuelto	Tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas. (IDEAM)	In situ - multiparámetro HANNA HI9829	Se promedió los valores obtenidos.	Se calculó el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto: $PS_{OD} = \frac{Ox \cdot 100}{C_p}$ Dónde: Ox: Es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/l) Cp: Es la concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l). Finalmente, el valor $I_{OD}$ se calcula así: $I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 \cdot PS_{OD})$
Demanda Química de Oxígeno	Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura.	Reflujo Abierto	$DQO = \frac{a - b) * N * 8000}{V_{muestra}}$ Dónde: DQO = mg/L. a = ml usado para el blanco. b = ml usado para la muestra. N = normalidad	-Si $DQO \leq 20$ , entonces $I_{DQO} = 0,91$ -Si $20 < DQO \leq 25$ , entonces $I_{DQO} = 0,71$ -Si $25 < DQO \leq 40$ , entonces $I_{DQO} = 0,51$ -Si $40 < DQO \leq 80$ , entonces $I_{DQO} = 0,26$ -Si $DQO > 80$ , entonces $I_{DQO} = 0,125$

Parámetro	Definición	Técnica de Análisis	Expresión de Resultados	Subíndice de Calidad
pH	Mide la acidez, valores extremos pueden afectar la flora y fauna acuáticas.	In situ - multiparámetro HANNA HI9829	Se promedió los valores obtenidos.	-Si $pH < 4$ ; entonces $I_{pH} = 0,1$ -Si $4 \leq pH \leq 7$ ; entonces $I_{pH} = 0,02628419 * e^{pH * 0,520025}$ -Si $7 < pH \leq 8$ ; entonces $I_{pH} = 1$ -Si $8 < pH \leq 11$ ; entonces $I_{pH} = 1 * e^{((pH-8)-0,5187742)}$ -Si $pH > 11$ ; entonces $I_{pH} = 0,1$
Sólidos Suspendedos Totales	Indica el cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros.	Gravimétrico	$SST = \frac{Papel_{fs} + m - Papel_m}{Vol_m}$ Dónde: $Papel_{fs}$ = Peso del papel filtro seco $m$ = peso de la muestra $Papel_{fv}$ = Peso del papel filtro vacío $Vol_m$ = Volumen de muestra	Si $SST \leq 4,5$ ; entonces $I_{SST} = 1$ Si $SST > 4,5 < 320$ ; entonces $I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 * SST \text{ (mg/l)})$ Si $SST \geq 320$ ; entonces $I_{SST} = 0$
Conductividad Eléctrica	Está íntimamente relacionada con la suma de cationes y aniones determinada en forma química, refleja la mineralización.	In situ - multiparámetro HANNA HI9829	Se promediaron los valores obtenidos.	$I_{C.E} = 1 - \frac{1}{10^{(-3,26 + 1,34 \text{ Log } 10(C.E))}}$ Cuando $I_{C.E} < 0$ , entonces $I_{C.E} = 0$

Fuente: <http://www.ideam.gov.co/>

Nota. Adaptada de la Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013.

En la tabla 30, se presenta la definición de los cinco parámetros que se tuvieron en cuenta para el cálculo del ICA, adicional a esto, se encuentra la técnica que se utilizó en cada uno, junto con el procedimiento que se realizó para la expresión de resultados, para así finalmente, obtener los subíndices de calidad. (IDEAM, 2013).

Después de hallar los subíndices de calidad de cada parámetro, se reemplazó en la Ecuación 20, la cual permitió realizar el cálculo del indicador. (IDEAM, 2013; López, E.A, y Rodríguez C.A., 2017).

La ecuación de cálculo del indicador es:

$$ICA_{njt} = \left( \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikt} \right)$$

Ecuación (20) Índice de calidad de agua

Donde:  $ICA_{njt}$ : Índice de calidad de agua en el punto de muestreo  $j$  en el tiempo  $t$ , evaluado con base en  $n$  variables;  $W_i$ : Ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad  $i$ ;  $I_{ikt}$ : Valor calculado de la variable;  $n$ : Número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador;  $n$  es igual a 5.

Finalmente, el valor que dio al reemplazar la ecuación (20) es comparado en la tabla 31 y así se logró determinar la calidad del agua de manera cualitativa.

La Tabla 31 describe los rangos de los valores obtenidos de la ecuación (15), con su respectiva calificación de acuerdo con su calidad y así mismo se le asigna un color en relación con su estado.

**Tabla 31** Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	Azul

Fuente: <http://www.ideam.gov.co/>

Nota. Adaptada de la Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00), por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013.

### 3.4.1 Calidad de agua de las quebradas Blanca y Pauda

Para la segunda fase, se llevó a cabo el cálculo del Índice de Calidad de Agua (ICA), se tuvo en cuenta dos puntos de muestreo representativos, uno en la quebrada Pauda y otro en la quebrada Blanca (Tabla 32) Estos puntos fueron escogidos en el lugar exacto donde se realiza la captación de agua, debido a que debe ser agua cruda apta para potabilizar.



**Tabla 32** Ubicación de los puntos de muestreo.

Puntos de muestreo	Coordenadas	
	N	E
Q. Blanca	1033409,486	964239,495
Q. Pauda	1033736,702	963222,584

Fuente: elaboración propia.

Nota. En la tabla se establecen las coordenadas del punto de captación tomadas en la primera visita que se realizó al acueducto.

Después de realizar el muestreo, medición y análisis, como se mencionó previamente, de los parámetros pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales, se pudo determinar el valor de estas variables, dando como resultado lo expuesto en la tabla 33.

**Tabla 33** Valores de los parámetros determinados en los puntos de muestreo para el cálculo del ICA.

Parámetros	Q. Blanca	Q. Pauda
Oxígeno Disuelto (ppm)	7,41	8,14
DQO (mg/L)	115,73	54,4
pH	7,91	7,84
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	82,5	67,94
Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	58,78	57,78

Fuente: autoría propia.

Nota. En la tabla 33 se registran los valores de cada quebrada tomados en la visita de campo al acueducto, medidos con el multiparámetro.

Tras determinar el valor de los parámetros anteriormente mencionados y obtener los subíndices de calidad, se procedió a realizar el cálculo del ICA para cada quebrada, dando como resultado la tabla 34.

**Tabla 34** Índice de calidad de agua.

Puntos de muestreo	Valor ICA	Calificación de la calidad del agua
Q. Blanca	0,77	Aceptable
Q. Pauda	0,86	Aceptable

Fuente: autoría propia.

Nota. En la tabla 34 se registra el valor del ICA calculado de la ecuación 1 con los valores tomados en la visita de campo.

Finalmente, como se muestra en la anterior tabla, la calificación de la calidad de agua de las quebradas Pauda y Blanca es aceptable, indicando que estas quebra-

das son capaces de soportar una alta diversidad de vida acuática y son apropiadas para todas las formas de contacto con ella y para la toma de agua para potabilización; además, la condición del recurso es cercana a la de su estado natural o a lo deseado (Alberro, N., 2010). También se ve reflejado que contiene niveles de contaminación bajos (Tambo C. 2015), es decir, que no hay presencia de vertimientos tanto industriales como residuales provenientes de la actividad económica existente en la zona.

### 3.5 DISEÑO, EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN DE LAS BOCATOMAS A PARTIR DE LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Por medio de una quinta visita al acueducto, se observó el tipo de bocatomas existentes y, se tomó las medidas de estas, es decir, el número, diámetro y longitud de las rejillas, las dimensiones de la presa, el ancho y profundo de las quebradas.

Tras realizar la visita de campo, se procedió a diseñar las bocatomas con el fin de evaluar la infraestructura hidráulica que actualmente se encuentra operando. Inicialmente se determinó la población de diseño por medio de los métodos lineal, geográfico y logarítmico; también, se halló el caudal de diseño, para que con un nivel mínimo en las quebradas pueda captar un caudal hasta 2 veces el Caudal Máximo Diario (QMD). Lo anterior, se realizó con base a la resolución 0330 de 2017 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio.

El diseño de la bocatoma lateral ubicado en la quebrada Pauda. En la tabla 35 se exponen las fórmulas que fueron empleadas para el diseño de la bocatoma lateral ubicada en la quebrada Pauda.

**Tabla 35** Metodología para el diseño de bocatoma lateral.

Parte del diseño	Fórmula	Descripción
Velocidad de aproximación	$0.80 \leq VR \leq 1.0 \text{ m/s}$	
Velocidad de paso	$0.10 \leq Vp \leq 0.40 \text{ m/s}$	
Tamaño de la varilla	Depende de la limpieza: Manual Vs. Mecánico Ancho (cm) 0,5-1,5 0,5-1,5 Profundidad(cm) 2,5-7,5 2,5-7,5 Espaciamiento entre rejillas(cm) 2,5-5,0 1,5-7,5 Velocidad de aproximación(m/s) 0,3-0,6 0,6-1,0 Pérdida de carga h1, 15 15 valor máx. en (cm)	

Parte del diseño	Fórmula	Descripción
Perdidas en la rejilla: Se determina mediante la ecuación de kirschmmer	$h = B(S/b)^{4/3} * hv * \text{sen } \theta$	Dónde: <i>B</i> : factor de forma (1.79 para varillas circulares; 242 para varillas rectangulares). <i>S</i> : espesor de la barra, en (m). <i>V</i> : velocidad de aproximación, en (m/s) <i>b</i> : distancia entre las barras (m). $\theta$ : Inclinación de la rejilla (grados). <i>h<sub>v</sub></i> : carga de velocidad o altura cinética del flujo que se aproxima a la rejilla (m).
Carga de velocidad o altura cinética	$h_v = \frac{v^2}{2g}$	Donde: <i>V</i> : velocidad de aproximación, en (m/s)
Factor de seguridad	$fs = 3h$	Dónde: <i>h<sub>r</sub></i> : pérdidas en la rejilla (m)
Formula de Villamonte vertedero sumergido	$Q = Q1 * (1 - S^n)^{0.385}$	Donde: <i>Q</i> : Caudal de captación $m^3/s$ <i>Q1</i> : Caudal captado si el vertedero fuera libre $m^3/s$ <i>S</i> : Relación de sugerencia <i>n</i> : 3/2 rectangular, 5/2 trapezoidal exponente en la formula como vertedero libre.
Sumergencia	$S = \frac{H - \text{perdidas}}{H}$	Donde: <i>H</i> : Carga (m)
Ecuación de Francis para vertederos de flujo libre	$Q = 1.84 LeH^{3/2}$	Donde: <i>Le</i> : Longitud efectiva (m) <i>H</i> : Carga sobre la cresta (m)
Número de espacios de la rejilla	$Ne = \frac{Le}{\text{diametro de las varilla}}$	Donde: <i>Le</i> : Longitud efectiva (m)
Número de varillas	$Nv = Ne - 1$	Donde: <i>Ne</i> : número de varillas
Vertedero lateral formula de Engesls	$Q = 1.86 Le^{0.9} H^{1.6}$	Donde: <i>Q</i> : caudal captado ( $m^3/s$ ) <i>Le</i> : longitud efectiva (m) <i>H</i> : carga sobre la cresta (m)

Fuente: <https://repository.ugc.edu.co/>

Nota. Adaptado de "Propuesta de diseño de la captación, línea de aducción, desarenador y línea conducción del río Mogoticos: para la red alterna del sistema de acueducto de la cabecera municipal de San Gil Santander", por D. Santos, 2015.

La tabla 36 presenta la metodología que se utilizó para el diseño de la bocatoma de fondo ubicada en la Quebrada Blanca.

**Tabla 36** Metodología para el diseño de la bocatoma de fondo.

Parte del diseño	Fórmula	Descripción
Lámina de agua en las condiciones de diseño	$H = \left(\frac{Q}{1,84l}\right)^{\frac{2}{3}}$	Q: Caudal mínimo de la cuenca.
Corrección por contracciones laterales	$L' = L - 0,2H$	L: Longitud del vertimiento
Velocidad del río sobre la presa	$V = \frac{Q}{L'H}$	
Alcance filo superior	$Xs = 0,36Vr^{2/3} + 0,60H^{4/7}$	Vr: Velocidad del río (m/s)
Alcance filo inferior	$Xi = 0,18Vr^{4/7} + 0,74H^{3/4}$	H: Profundidad de la lámina de agua sobre la presa (m)
Ancho canal de aducción	$B = Xs + 0,10$	
Área neta	$An = \frac{Q}{0,9 * Vb}$	Vb: Velocidad entre barrotes
Longitud de la rejilla	$Lr = \frac{An * Sb * \phi barra}{Sb * B}$	Sb: Ancho barrotes B: Ancho canal de aducción
Área neta	$An = \frac{Sb}{Sb + \phi barra} * B * Lr$	
Numero de orificios	$N = \frac{An}{a * B}$	a: separación entre barrotes (m)
Área neta Recalculada	$An = a * B * N$	N: número de orificios entre barrotes
Velocidad entre barrotes recalculada	$Vb = \frac{Q}{0,9 * An}$	
Niveles de agua (aguas abajo)	$he = hc = \left(\frac{Q^2}{g * B^2}\right)^{\frac{1}{3}}$	g: aceleración de la gravedad 9.81 (m/s <sup>2</sup> )
Longitud del canal	$Lc = Lrejilla + espesor del muro$	
Niveles de agua (aguas arriba)	$ho = \left[2he^2 + \left(he - \frac{iLc}{3}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}iLc$	i: Pendiente del fondo del canal
Altura total muros canal de aducción	$Ho = ho + BL$	B: Ancho canal de aducción L: Longitud del canal

Parte del diseño	Fórmula	Descripción
Altura total muros canal de aducción	$He = Ho + i * Lc$	i: Pendiente del fondo del canal
Velocidad del agua al final del canal	$Ve = \frac{Q}{B * he}$	
Alcance filo superior cámara de recolección	$Xs = 0,36Ve^{2/3} + 0,60he^{4/7}$	
Alcance filo inferior cámara de recolección	$Xi = 0,18Ve^{4/7} + 0,74he^{3/4}$	
Ancho cámara	$Bcam = Xs + 0,30$	
Altura de la lámina de agua en la garganta de la bocatoma	$H = \left(\frac{Qmax}{1,84 * L}\right)^{2/3}$	
Altura de la lámina de agua en la garganta y el caudal de excesos	$H = \left(\frac{Qmedio}{1,84 * L}\right)^{2/3}$	
Caudal captado	$Qcaptado = Cd * An * \sqrt{2 * g * H}$	Cd: Coeficiente de descarga
Caudal de excesos	$Qexcesos = Qcaptado - Qdiseño$	
Altura de excesos	$Hexc = \left(\frac{Q}{1,84 * Bcam}\right)^{2/3}$	
Velocidad de excesos	$Vexc = \frac{Qexc}{Hexc * Bcamara}$	
Alcance vertedero de excesos	$Xs = 0,36Vexc^{2/3} + 0,60Hexc^{4/7}$	

Fuente: <https://repository.ucatolica.edu.co/>

Nota. Adaptada de "Diseño hidráulico de obras civiles para la captación y tratamiento de agua cruda del sistema de acueducto centro poblado la magdalena municipio de quebrada negra, Cundinamarca" por L. Cubillos y J. Naranjo, 2018.

Finalmente, se plantean estrategias de optimización para las bocatomas a partir de la producción más limpia (P+L), considerando que es una estrategia ambiental preventiva e integrada que va enfocada hacia los productos, servicios y procesos productivos, a fin de reducir costos, incentivar innovaciones y reducir los riesgos significativos al ser humano y al ambiente. La P+L se apoya en los principios de sustitución, reducción en la fuente, conservación de la energía y en los conceptos y prácticas del diseño para el ambiente, de tal manera que simultáneamente logra una reducción en los riesgos y el surgimiento de nuevas ventajas competitivas. (Barrios E. y Loreto D., 2003).

Las alternativas de P+L se encuentran clasificadas en cinco categorías, las cuales son: buenas prácticas, sustitución de materias primas o insumos, cambios en el proceso, optimización de procesos y en las mejoras tecnológicas. (Vargas J, 2006). Teniendo en cuenta, el proceso que se lleva a cabo en el acueducto y para el objetivo de este proyecto se emplearon tres de estas alternativas para optimizar el funcionamiento de las bocatomas en pro del medio ambiente. A continuación, se mencionan dichas alternativas:

Las *buenas prácticas* están relacionadas a las medidas de alto potencial de ahorro a bajo costo (Vargas J., 2006), es por esto que se buscó implementar un mantenimiento preventivo de las redes hidráulicas y un reporte de fugas y escapes con el fin de minimizar pérdidas de agua.

Por su parte, la *sustitución de materias primas e insumos* consiste en reemplazar materiales existentes por otros ambientalmente amigables (Vargas J., 2006). Por esta razón, se buscó plantear estrategias de optimización integrando la variable ambiental en el diseño de las bocatomas, asignándole un mismo valor a los aspectos tradicionales del diseño, tales como la funcionalidad, la estética, la calidad y el material de construcción.

Y, por último, están las alternativas de mejoras tecnológicas, las cuales consisten en la modificación de equipos existentes y/o instalación de equipos nuevos, por lo tanto, se propuso alternativas para incorporar al diseño de las bocatomas instalaciones, tales como sensores o cierres automáticos.

### 3.5.1 *Diseño, evaluación y propuestas de alternativas de optimización de las bocatomas ubicadas en las quebradas Pauda y Blanca a partir de la producción más limpia*

Al analizar el estudio hidrológico y topográfico, se evidencia que la bocatoma lateral ubicada en la quebrada Pauda, es adecuada debido a que este tipo de estructura hidráulica tiene menor posibilidad de obstrucción de la rejilla, por lo que el lecho de la cuenca tiene una pendiente suave (Materón H., 1997).

**Tabla 37** Resultado análisis hidrológico para diseño de bocatoma.

Parámetros	Q. Blanca	Q. Pauda
Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0,032	0,035
Profundidad del cauce (m)	0,265	0,360
Topografía	La quebrada cuenta con pendientes del 8%, es decir, que tiende a tener crecientes. Su caudal máximo neto es de 1,08 m <sup>3</sup> /s. Su elevación mínima es de 1350 y su máxima es de 2250 msnm.	La quebrada Pauda tiene una pendiente del 2%, es decir, que presente pequeños relieves. En una distancia de 50 metros horizontales experimenta desniveles de 2 metros subidos o bajados por lo tanto no presente grandes crecientes.

Fuente: autoría propia.

Nota. En la tabla 37 se hace un resumen de la información obtenida del estudio hidrológico que se toma como base para hacer el diseño de las bocatomas.

A continuación, en la tabla 38 se expone el resultado del diseño de la bocatoma lateral ubicada en la quebrada Pauda, donde se pudo obtener la información necesaria para comparar con las que se encuentra operando actualmente sin estudios previos.

**Tabla 38** Diseño de bocatoma lateral quebrada Pauda.

Diseño	Valor
Velocidad de aproximación	0,6 m/s
Rejillas	Ancho: 0,02 m
	Inclinación: 45 °
	Espacio entre rejas: 0,0254 m
	Pérdida carga: 0,6 m
	Factor de forma: 1,790
Perdidas en la rejilla	0,020 m
Factor de seguridad	0,061 m
Vertedero no sumergido	0,06 m <sup>3</sup> /s
Sumergencia	0,884
Ecuación de Francis para vertederos de flujo libre	0,845 m
Número de espacios de la rejilla	27
Número de varillas	26
Longitud total de las rejillas	1,04m

Fuente: autoría propia.

Nota. Se expone el resultado obtenido tras realizar el diseño de la bocatoma lateral en la quebrada Pauda.

Posterior a esto, como se muestra en la tabla 39, se pudo comparar la bocatoma que está en el acueducto actualmente operando con la diseñada tras realizar los estudios tanto topográficos, como hidrológicos. Es importante aclarar que esta comparación se realizó con criterios de diseño básicos, ya que como ha venido mencionando la actual bocatoma no tiene estudios previos que soporten el diseño.

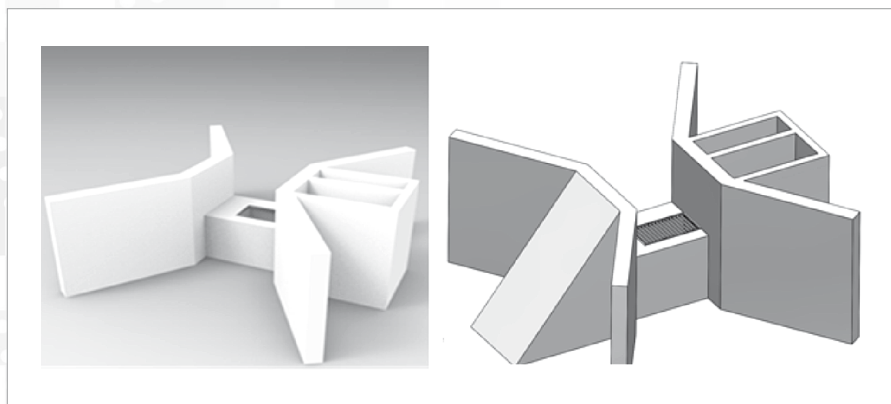
**Tabla 39** Comparación bocatoma lateral.

Criterio	Bocatoma lateral actual	Bocatoma diseñada
Longitud total	0,50 m	1,04 m
No. de varillas	14	26
Diámetro	0,01 m	0,02 m
Espacio entre varillas	0,02 m	0,0254 m
Inclinación	38°	45°

Fuente: autoría propia.

*Nota. En esta tabla se realiza una comparación de los principales criterios entre la bocatoma que está actualmente en funcionamiento y la que fue diseñada tras realizarle los estudios correspondientes.*

A continuación, en la Figura 30 se puede evidenciar la representación del diseño realizado de la bocatoma lateral modelado por medio del software Solidworks.



**Figura 30** Bocatoma lateral Quebrada Pauda.

Fuente: autoría propia.

*Nota. Esta figura es la representación del diseño de la bocatoma lateral planteado para la quebrada Pauda elaborado por medio de software Solidwork.*

Después de realizar la comparación, se pudo observar que el tamaño de las rejillas que hay actualmente es muy pequeño, también, es muy importante aumentar la longitud e inclinación, ya que, al tener mayor longitud e inclinación permite realizar una mejor limpieza y mantenimiento tanto para la rejilla, como el canal de derivación de la bocatoma lateral (Quintero, K., B. 2009).



En cuanto a la bocatoma de fondo, es importante tener en cuenta la ubicación donde se realice la construcción, pues, como se demuestra en la Figura 31, la anterior estructura se encontraba situada en una curva, lo anterior, también se pudo comprobar por medio de las coordenadas tomadas en campo, pues al ubicarlas en ArcGis junto con las curvas de nivel se evidencio que efectivamente la ubicación era errónea, ya que en estas situaciones el suelo tiende a erosionarse y como consecuencia se remueve la infraestructura. El sitio adecuado, debe estar por debajo del nivel de aguas mínimas y por encima del nivel de sedimentación del fondo; es decir en un lugar recto.



**Figura 31** Ubicación de la bocatoma de fondo removida.

Fuente: autoría propia, 2018.

*Nota. Esta figura fue tomada en la quinta visita de campo en el año 2018, en ella se observa la ubicación en la que se encontraba la bocatoma que fue removida; esta estructura se encontraba en una curva.*

Considerando lo anterior, se planea construir una bocatoma de fondo en la quebrada Blanca tras removerse la que existía, teniendo en cuenta que este tipo de estructura hidráulica es apta para la quebrada Blanca, ya que este tipo de bocatoma es utilizada en ríos o quebradas pequeñas, las cuales la lámina de agua en épocas de verano se reduce considerablemente. La idea del diseño de este tipo de bocatomas es la de proyectar una estructura que se acomode lo más posible a la forma del lecho del río o quebrada, procurando que en la época de caudal mínimo la totalidad del caudal pase sobre la rejilla de derivación (Rincón, R., 2004).

Se realizó el diseño de la bocatoma de fondo en la quebrada Blanca como se muestra en la tabla 40

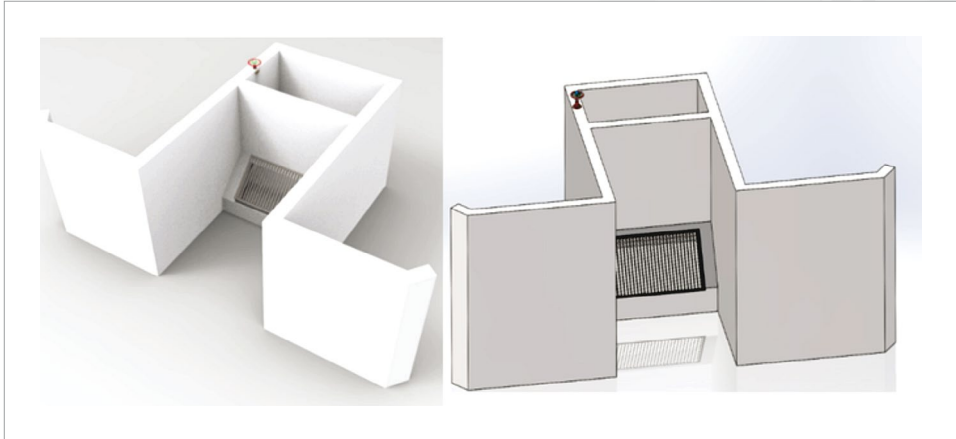
**Tabla 40** *Diseño de bocatoma de fondo quebrada Blanca.*

Diseño	Valor
Lámina de agua en las condiciones de diseño	0,11 m <sup>3</sup> /s
Corrección por contracciones laterales	0,99
Velocidad del río sobre la presa	0,31 m/s
Alcance filo superior	0,33 m
Alcance filo inferior	0,27 m
Ancho canal de aducción	0,43 m
Área neta	0,18 m
Longitud de la rejilla	0,68 m
Área neta	0,68 m
Numero de orificios	16
Área neta recalculada	0,21 m
Velocidad entre barrotes recalculada	0,17 m/s
Niveles de agua (aguas abajo)	0,05 m
Longitud del canal	1
Niveles de agua (aguas arriba)	1,36 m
Altura total muros canal de aducción	1,79 m
Altura total muros canal de aducción	9,79 m
Velocidad del agua al final del canal	1,66 m/s
Alcance filo superior cámara de recolección	1,21 m
Alcance filo inferior cámara de recolección	0,60 m
Ancho cámara	1,52 m
Altura de la lámina de agua en la garganta de la bocatoma	0,22 m
Altura de la lámina de agua en la garganta y el caudal de excesos	0,18 m
Caudal captado	0,04 m <sup>3</sup> /s
Caudal de excesos	0 m <sup>3</sup> /s
Altura de excesos	0,01 m
Velocidad de excesos	0,57 m/s
Alcance vertedero de excesos	0,41 m

Fuente: autoría propia.

*Nota. En la tabla 40 se expone el resultado obtenido del diseño de la bocatoma de fondo ubicada en la quebrada Blanca.*

Luego de realizar el diseño, se procedió a representarlo por medio del software Solidworks, como se evidencia en la Figura 32 con el fin de poder visualizarlo y obtener una fácil interpretación.



**Figura 32** Bocatoma de fondo quebrada Blanca.

Fuente: autoría propia.

*Nota. La figura es la representación del diseño de la bocatoma de fondo planteado para la quebrada Blanca elaborado por medio de software Solidwork.*

### 3.5.1.1 Propuestas de alternativas de optimización de las bocatomas a partir de la producción más limpia

Luego de realizar el diseño de las bocatomas y la respectiva comparación con la que ya existe, se procede a plantear estrategias de optimización a partir de la producción más limpia, por medio de las siguientes alternativas:

- *Buenas prácticas:* Se propuso implementar un manual de buenas prácticas, en el que se encuentre los planos actualizados del acueducto, identificando los puntos donde se realiza el mantenimiento preventivo de las redes hidráulicas periódicamente, el procedimiento, los materiales, insumos y herramientas que requieran, los elementos de protección personal y los riesgos asociados, con el objetivo de que el fontanero o cualquier personal del acueducto pueda efectuarlo de manera segura, práctica y eficaz. Lo anterior, con el fin de alargar la vida útil de las instalaciones, de detectar, reportar y reparar fugas.
- *Sustitución de materias primas e insumos:* Para la construcción que se va a realizar de la bocatoma de fondo, se planteó utilizar como materia prima ladrillos ecológicos los cuales están hechos con un suelo arcilloso, marga gris, 5% de cal hidráulica natural, 8% de cenizas de cáscaras de arroz residuo de la industria de la biomasa, y un 5% de cascarillas de arroz subproducto de la cosecha del

mismo. Es un producto con óptimas características mecánicas, obteniéndose buenos resultados de resistencia a compresión y a inmersión en agua, y excelente durabilidad frente a temperaturas extremas. (Cabo Laguna, M., 2011)

Los ecoladrillos responden a criterios ecológicos y sostenibles, ya que, requiere un bajo nivel de energía para su fabricación y se elimina la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al ser ladrillos que no requieren de cocción. Este tipo de ladrillo pulzánico ecológico sin cocción, incrementa su valor ecológico al contener como componentes del mismo, aditivos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, sobre todo por el ahorro energético que se produce en el proceso de su fabricación. (Cabo Laguna, M., 2011)

- Y, por último, se propuso alternativas de mejoras Tecnológicas, las cuales consisten en implementar un sistema de cierre automático y en los casos que sea factible, se deberá automatizar la provisión del fluido a través de sensores de nivel, caudal, temperatura y tiempo en las válvulas y tubos (Quintero, O., 2007), con el fin de hacer el mantenimiento adecuado en el menor tiempo posible en caso de tener alguna fuga o sedimentación. También, se requiere la implementación de mallas en los sifones o salidas entre una tubería a otra y así detener el paso de partículas de gran tamaño, facilitando la limpieza y/o mantenimiento.

### 3.6 CONSIDERACIONES FINALES

La integración de la hidrología con la geografía, específicamente por medio de los sistemas de información geográfica permite hacer una simulación del comportamiento de las cuencas actualmente y en un futuro. A partir del análisis hidrológico se planteó el caudal de diseño que en promedio es de 11,6 m<sup>3</sup>/s. Teniendo en cuenta esto, las fuentes hídricas están en la capacidad de abastecer hasta 25 años a la población, pues las quebradas se encuentran en una zona con un buen ciclo hidrológico.

A partir del estudio hidrológico se evalúa la posibilidad de realizar proyectos, obras y/o actividades, pues indica que tan viable será para la zona este tipo de construcciones. Por otro lado, permite analizar el estado físico en el que se encuentra la cuenca a estudio, su evolución a través del tiempo y modelar a futuro su estado.

La calidad de agua para las dos quebradas indica que es aceptable, no requiere de ningún tratamiento a parte del primario, ni prevención o control previo a la captación para el consumo humano, en estas quebradas se puede tener contacto directo sin ningún inconveniente.

Se recomienda seguir monitoreando el ICA y ampliar los parámetros de control con la relación nitrógeno total/fósforo total, ya que esta relación permite medir la de-

gradación por intervención antrópica y la posibilidad de la fuente de asimilar carga orgánica. De igual manera, se sugiere hallar este indicador durante diferentes épocas del año debido a que los parámetros medidos varían de factores ambientales, tales como la precipitación y la temperatura. Es por esto, que resulta necesario llevar control de los caudales por medio del estudio hidrológico, con el fin de cruzar la variable caudal, con la variable de calidad, para así determinar la incidencia de los niveles de las corrientes superficiales para la asimilación de contaminantes y su consecuente auto recuperación.

En cuanto a las bocatomas, una desventaja del tipo de bocatomas lateral, es cuando la corriente arrastra mucho material en época de lluvias, este se deposita en el pie del muro transversal, llegando a tapar completamente la rejilla y el desagüe (López Cualla, 2003). Es por esto que se recomienda hacer mayor énfasis en la bocatoma de fondo, ya que se evidencia que esta se adapta más a las condiciones de las quebradas y su funcionamiento sería más óptimo.

Con relación a las estrategias de optimización propuestas, se considera importante realizar el manual de buenas prácticas, ya que por medio de este se puede tener un soporte de ayuda para realizar los mantenimientos preventivos correspondientes y evitar disminución del caudal. También, se considera conveniente realizar la automatización de las estructuras hidráulicas, ya que permite observar las pérdidas de fluido en las instalaciones de manera más eficaz y rápida solucionando de manera inmediata.

Finalmente, se resalta las ventajas ambientales que trae consigo la utilización de los ladrillos ecológicos como materia prima para la construcción de la bocatoma de fondo en la quebrada Blanca, ya que tienen menor impacto ambiental, debido a que requieren menos energía y no se necesita combustible en su fabricación.



# Evaluación de la red de acueducto y abastecimiento del municipio de Choachí Cundinamarca desde la captación hasta la planta de potabilización



## Capítulo 4

## 4.1 INTRODUCCIÓN

La hidrología es una ciencia que estudia la cantidad, disponibilidad y la distribución del agua sobre la tierra, esta distribución nace de la necesidad de estudiar el uso, mantenimiento y protección del recurso hídrico para brindar posibles soluciones ambientales. Una de las ramificaciones que utiliza la hidrología para definirse y complementarse, es la meteorología que asocia aspectos como la precipitación y su relación con la atmosfera, esto con el fin de saber el comportamiento que tendrá la cuenca alrededor del año debido a que el agua que llega a la cuenca a partir de la precipitación produce unos caudales en las fuentes hídricas que son la fuente de estudio. La conservación de estas es un tema de vital importancia, ya que, a consecuencias de la mano del mismo hombre, dicho recurso está escaseando y debe generar una preocupación en la población debido a que todas las actividades que realiza el hombre requieren del agua.

Estos conceptos son claves en el momento de desarrollar el análisis hidrológico para la quebrada Potrero Grande y el nacimiento Potreritos, con el fin de optimizar y adecuar la red de acueducto y abastecimiento de Choachí, el cual a pesar de contar con 12 fuentes hídricas para la red de distribución del casco urbano solo se abastece de las fuentes mencionadas anteriormente, de los cuales no se tiene información de su capacidad hídrica por lo que se requiere desarrollar un adecuado estudio para determinar los mejores planes y estrategias en cuanto al mejoramiento de estructuras hidráulicas y así cumplir con el abastecimiento de la población.



Este estudio se realizó, con el fin de proponer una solución de optimización del acueducto del municipio de Choachí Cundinamarca dividido en tres fases, en la primera se adelantó una proyección poblacional para así establecer el nivel de demanda para uso potable, en la segunda fase se hizo un levantamiento estructural del acueducto ya existente con el fin de que al hacer un rediseño e identificar si este necesitaba unas modificaciones para poder operar en estado óptimo para la demanda de la población y una tercera fase de evaluación hidrológica. Este es un estudio que se puede replicar en varios municipios del país ya que a partir de los acueductos municipales se pueden generar medidas correctivas para las épocas de sequía y poder hacer un análisis de nuevas fuentes de captación que pueden utilizar.

## 4.2 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para identificar si el acueducto requiere de una optimización, empieza con recopilar la información documental necesaria como informes previos, mapas de información geográfica, censos poblacionales e información hidrológica de las estaciones más cercanas.

A continuación, se presenta cada una de las fases:

### 4.2.1 Aforos

Para la realización de aforos se tomará un punto estratégico dentro de ambas quebradas para obtener los parámetros hidrológicos, para esto es necesario el uso de un micro molinete e identificación del vertimiento principal; este aforo se realizará cada 50 metros para obtener la lectura de nivel y medidas del caudal.

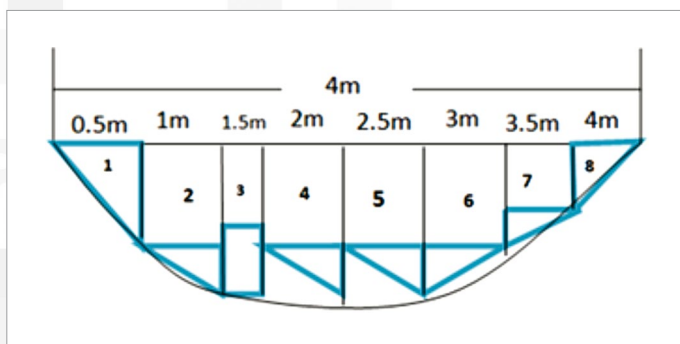
El aforo que se llevó a cabo en la quebrada Potreo Grande esta se hizo a 4 metros a nivel horizontal y se tomaron 8 medidas para la profundidad correspondiente cada 0.5 metros cada 0.5 metros en distancia horizontal.



**Figura 33** Aforo en la quebrada Potrero Grande.

Fuente: autoría propia.

La manera en que se llevaron a cabo los cálculos, fue mediante la implementación de geometría básica, para hallar áreas de las correspondientes figuras formadas en las 8 secciones:



**Figura 34** Secciones del aforo.

Fuente: autoría propia.

A partir de los datos obtenidos, los resultados fueron resumidos en la siguiente tabla:

**Tabla 41** Área del Aforo.

Número de medición (Metros)		Profundidad (Metros)	Velocidad (Metros / Segundo)	Área (Metros cuadrados)
1	0,5	0,32	0,1	0,08
2	1	0,4	0,4	0,18
3	1,5	0,3	0,2	0,15
4	2	0,32	0,2	0,0025
5	2,5	0,4	0,4	0,1775
6	3	0,31	0,3	0,1775
7	3,5	0,2	0,3	0,1275
8	4	0,16	0,4	0,04
Promedio			0,2875	0,935
Aprox.			0,29	Suma

Fuente: autoría propia.

Después de la obtención del área total del aforo, se utiliza la siguiente formula con el fin de poder obtener un estimativo del valor actual del caudal con el que trabaja la planta de potabilización, se utilizó el micromolinete que es un equipo importante en la determinación de caudales.

*Cálculo del caudal*

$$Q = V * A$$

$$Q = 0,29 \frac{m}{s} * 0,935 m^2 \quad Q = 0,27115 m^3/s$$

#### 4.2.2 Parámetros hidrológicos y geomorfológicos

Los parámetros hidrológicos y geomorfológicos a evaluar se hicieron sobre los existentes, sin embargo, también fueron calculados a partir de datos obtenidos por la Alcaldía.

Inicialmente fue necesario contar con la cartografía base del municipio de Choachí, por lo cual se obtuvieron las planchas Plancha 247 –I – A, Plancha 248 –III- A, Plancha 228-II-D, Plancha 247-I-B, Plancha 247-I-B (2) del instituto geográfico Agustín Codazzi a una escala de 1:25000.

Para llevar a cabo el cálculo de estos parámetros se hace necesario la identificación y creación de las isoyetas, por lo tanto, se servirá de apoyo de programas como

AutoCAD y ArcGIS que para la obtención de estos parámetros solo es necesario conocer las coordenadas del lugar y datos proporcionados por las estaciones meteorológicas aledañas a las zonas, las cuales son Choachí- El Uval, Torca, Casita La, Picota La, Bosque El, palacios El Angulo y Mundo nuevo, elegidas por su proximidad a la quebrada Potrero Grande, con estas estaciones meteorológicas del IDEAM y la CAR registran información de Precipitación, temperatura y humedad.

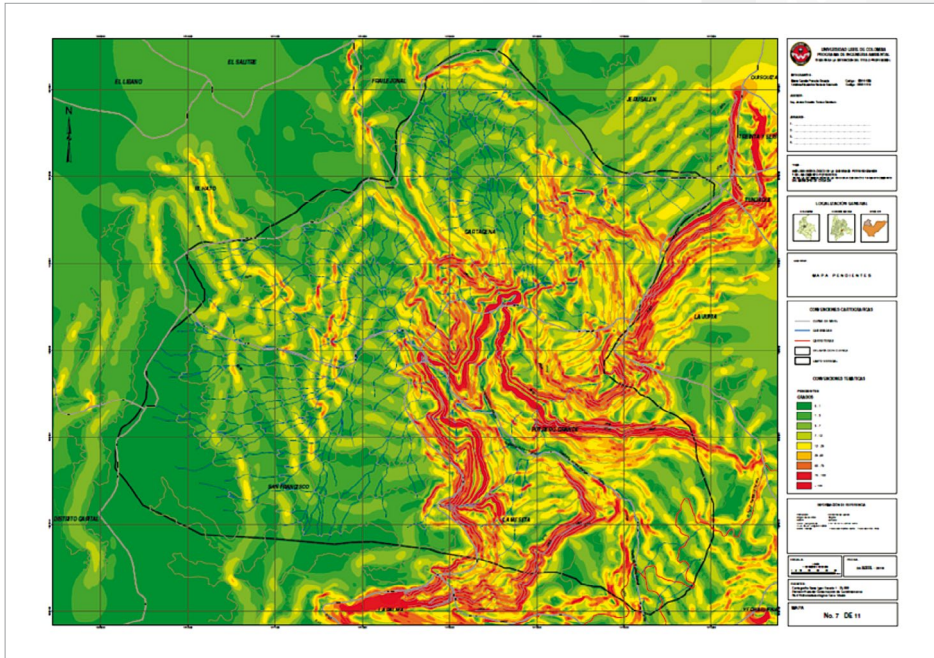
#### 4.2.2.1 Área

La línea divisora de aguas la cual se realizó por los picos más altos de la cuenca no corta ninguna corriente de agua, excepto la salida de ella; se utilizó la información de la cartografía previamente digitalizada, el dato obtenido fue: 27, 219,6630.75 ; de acuerdo con este valor es importante porque dependiendo del área tributaria depende el caudal que puede drenarse, se determinaron los valores para los caudales de diseño.

#### 4.2.2.2 Pendiente

Para determinar la pendiente, se generó el gráfico de pendientes a partir de las curvas de nivel encontradas en la cartografía base del IGAC a escala 1:25000 y se tuvieron en cuenta datos de la red hidrometeorológica de la CAR y el IDEAM, estos datos se trabajaron mediante un sistema de información geográfica como ArcGIS.

“La velocidad de escurrimiento de las corrientes fluviales depende del grado de pendiente de sus cauces. De ahí la importancia de deducir estos parámetros, ya que se aplica en la mayoría de las fórmulas que hacen alusión a la determinación de los caudales extremos y al tránsito y propagación del creciente en los cauces naturales y artificiales; la pendiente media total de las corrientes de agua indica también el aspecto de la variación de algunas características fisicoquímicas de las aguas. En este sentido, por ejemplo, una corriente de pendiente pronunciada tendrá siempre aguas mejor oxigenadas y mineralizadas, debido a la mayor turbulencia y la mayor capacidad de erosión y transporte. En enlace con el contenido de oxígeno y mineralización, las condiciones biológicas serán a su vez más favorables”. (IDEAM, 2007).



**Figura 35** Pendientes.

Fuente: autoría propia.

La pendiente media de la corriente ( $I_c$ ) es la relación entre la diferencia de elevaciones ( $H_{max} - H_{min}$ ) y la longitud total de la corriente del río ( $L$ ).

$$P_c = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Ecuación (21) *Pendiente media*

Donde:

Cota Max: 3226,715; Cota min: 2190,659; Longitud: 7946,83 metros lineales.

Que de acuerdo al numeral mencionado anteriormente, nos da un valor de: 0.13 %, esto nos indica que para el municipio de Choachí en su mayoría hay zonas planas y que una de estas es donde se encuentra la parte urbana.

#### 4.2.2.3 Perímetro

Para conocer el perímetro de nuestra área de estudio y poder relacionar la forma de la cuenca con la respuesta hidrológica, se utilizó la digitalización inicial que se hizo en AutoCAD y se obtuvo el valor de: 28.363,87 metros, esto con el fin de conocer las características geomorfológicas particulares de la cuenca.

#### 4.2.2.4 Longitud

Para determinar la longitud del cauce principal, se utiliza la digitalización de la cartografía base a partir de esto se obtienen un valor de: 7.946,83 metros para la quebrada potrero grande dentro la divisoria de aguas que se hizo.

#### 4.2.2.5 Forma de la cuenca

“La forma de la cuenca se determina utilizando el coeficiente de compacidad (Kc) esta es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que posea igual área a la cuenca se calcula mediante el uso de la siguiente ecuación” (Monsalve G, 1995):

$$Kc = \frac{\text{perímetro de la cuenca}}{\text{perímetro círculo igual area}} \quad Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Ecuación (22) Forma de cuenca

**Tabla 42** Forma de la cuenca.

Kc	Forma de la cuenca	Tendencia crecidas
1 – 1.25	De casi redonda a oval redonda	Alta
1.25 – 1.5	De oval redonda a oval oblonga	Media
1.5 – 1.75	De oval oblonga a rectangular	Baja

Fuente: autoría propia.

Para lo cual nos da un valor de 1,5336 que de acuerdo con los valores expresados nos indica que la cuenca es de forma oval oblonga a rectangular.

#### 4.2.2.6 Precipitación media de la cuenca

Para realizar los cálculos correspondientes a la precipitación media de la cuenca se analizarán a partir de las estaciones meteorológicas más cercanas al municipio, Choachí- El Uval, Torca, Casita, La Picota, El Bosque, palacios El Ángulo y Mundo nuevo, por ende, se utilizará el programa ArcGIS.

Como procedimiento para determinar la precipitación media están los Polígonos de Thiessen, que se aplica en zonas donde la topografía no afecte de forma considerable la distribución de las lluvias, este método posee el siguiente procedimiento (Monsalve G, 1995), así:

- Tener un esquema de la cuenca y las estaciones meteorológicas que estén dentro o cerca de ella.

- Unir las estaciones formando triángulos con el criterio de la menor distancia.
- Trazar mediatrices en cada lado de los triángulos formados construyendo una serie de polígonos.
- Aplicar la fórmula:

$$P_m = \frac{P_1 * A_1 + P_2 * A_2 + \dots + P_n * A_n}{A_t}$$

Ecuación (23) *Precipitación media de la cuenca*

Donde:

$A_i$ = Área parcial de cada polígono;  $A_t$ = Área total;  $P_i$ =Precipitación presentada en cada estación;  $P_m$ = Precipitación media de la cuenca.

Debido a que el sistema de información geográfica que aplicaremos, ArcGIS, posee la técnica de medición de los polígonos de Thiessen, se usará este método por lo que se debe conocer a cabalidad las estaciones cercanas a la cuenca.

#### 4.2.2.7 *Evapotranspiración real*

Para la determinación de este factor, se utilizará el método de Turc ya que nos relaciona los aspectos climáticos como la temperatura y la precipitación, estos datos se obtendrán a partir de los parámetros climáticos que arrojan las diferentes estaciones meteorológicas cercanas a la zona, se llevara a cabo este método ya que tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol.

Este método está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la precipitación en (mm/año) y la temperatura media anual, en donde L está en función de la temperatura (Monsalve G, 1995):

$$E = \frac{P}{\left(0,9 + \frac{P^2}{L(t)^2}\right)^{0,5}}$$

Ecuación (24) *Evapotranspiración real*

Dónde:

$ETP$ = Evapotranspiración real en (mm/año);  $P$  = Precipitación en (mm/año);  $L$ :  $300+25t+0.05 t$ ;  $T$ : Temperatura media anual en (°C)

#### 4.2.3 *Proyección de la oferta y demanda*

El primer paso para proyectar la oferta y demanda que tendría el acueducto, es hacer una proyección de población hasta el año 2039, a partir de los censos poblacionales realizados por el DANE en el municipio de Choachí.

**Tabla 43** Población.

Año	Población
1938	722
1951	1242
1964	2173
1973	1663
1993	2880
1999	3203
2005	3450

Fuente: DANE.

La proyección se hizo mediante los métodos de crecimiento lineal, geométrico, logarítmico, sensibilidad, estadístico y Wappus; este último se descartó ya que no se encontraba dentro del rango de los demás.

**Tabla 44** Métodos para la determinación del crecimiento poblacional.

Crecimiento lineal	ka =	39,567
	P2014 =	3729
	P2026 =	4204
	P2039 =	4718
Crecimiento geométrico	r =	0,023
	P2014 =	4149
	P2026 =	5468
	P2039 =	7375
Crecimiento logarítmico	Kg1 =	0,042
	Kg2 =	0,043
	Kg3 =	0,023
	Kg4 =	0,004
	Kg5 =	0,018
	Kg6 =	0,009
	promedio	0,023
	P2014 =	4126
	P2026 =	5433
	P2039 =	7320
Método Wappus	i =	1,932
	P2014 =	4713
	P2026 =	8923
	P2039 =	59179

Fuente: autoría propia.

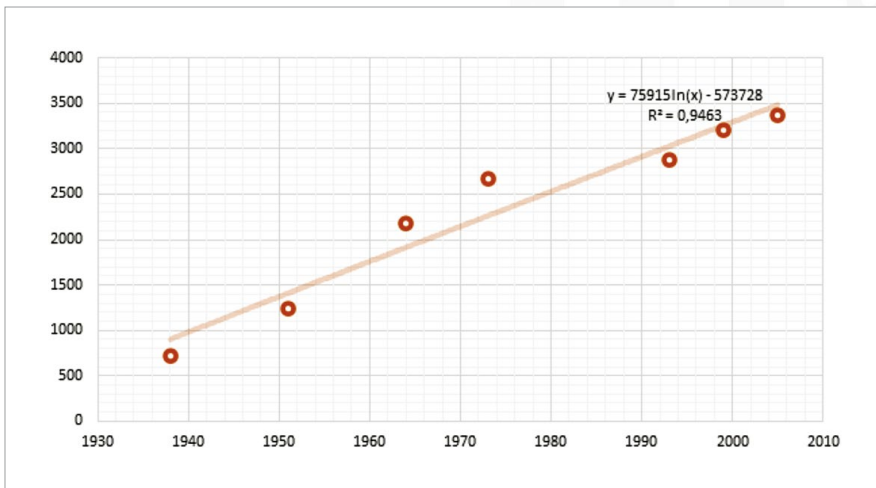


**Tabla 45** Método de sensibilidad.

Pci	R	2014	2026	2039
1938	0,023	4149	5468	7375
1951	0,019	3984	4975	6327
1964	0,011	3715	4225	4857
1973	0,007	3605	3939	4336
1985	0,008	3622	3982	4412
1993	0,004	3506	3692	3905
<i>Promedio</i>		3763	4380	5202

Fuente: autoría propia.

Para realizar el método estadístico, a partir de las siguientes figuras se identificó qué línea tenía la tendencia aproximaba más a 1 (uno), la cual era un logarítmico y a partir de esta ecuación se calculó la población futura.



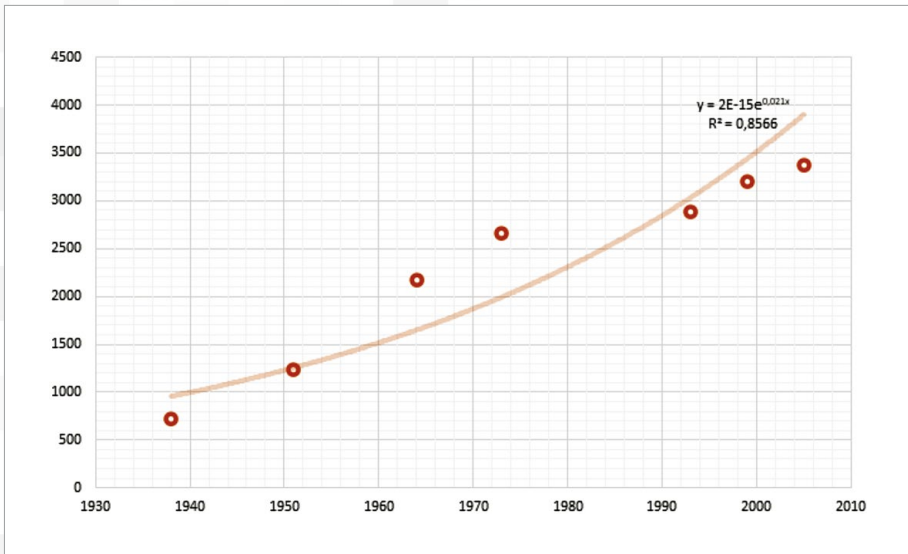
**Figura 36** Método logarítmico.

Fuente: autoría propia.

**Tabla 46** Método logarítmico.

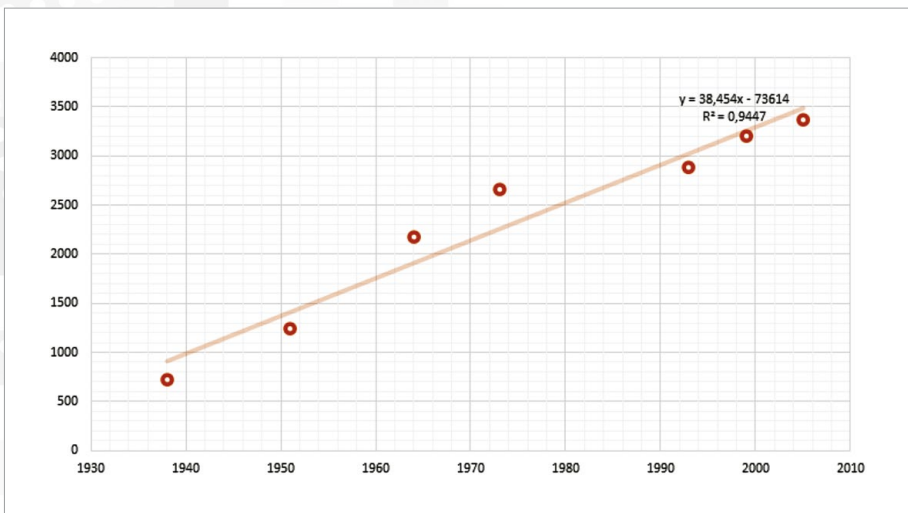
Logarítmico	
P2014 =	3824
P2026 =	4275
P2039 =	4761

Fuente: autoría propia.



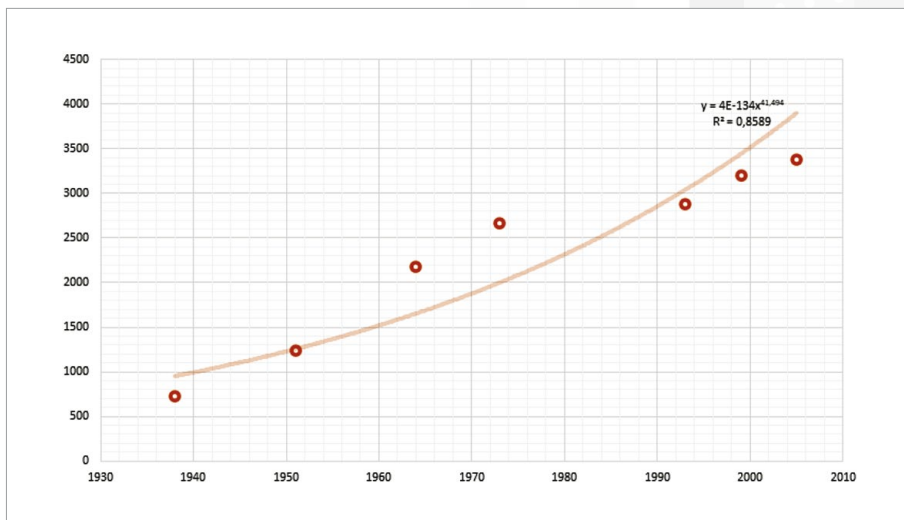
**Figura 37** Método exponencial.

Fuente: autoría propia.



**Figura 38** Método lineal.

Fuente: autoría propia.



**Figura 39** Método potencial.

Fuente: autoría propia.

A partir de los anteriores resultados, se saca un promedio para así obtener los resultados finales de proyección, aclarando que el método de wappus se muestra, sin embargo, no es tomado en cuenta dentro de los cálculos.

**Tabla 47** Población de diseño.

Año	Lineal	Geométrico	Logarítmico	Wappus	Sensibilidad	Estadístico	Promedio
2014	3729	4149	4126	4713	3763	3824	3918
2026	4204	5468	5433	8923	4380	4275	4752
2039	4718	7375	7320	59179	5202	4761	5875

Fuente: autoría propia.

De acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 se proyectó a 25 años; a partir de este lapso se prosiguió a identificar cuál sería el incremento poblacional y consumo neto:

**Tabla 48** Incremento poblacional.

Año	Población	Incremento poblacional (%)	Incremento de dotación	Consumo neto	% pérdidas	Consumo neto total
2014	3918	21,28	2,13	135,00	25,00	180
2026	4752	23,63	2,36	137,873	15,00	181
2039	5875			141,13	23,00	183

Fuente: autoría propia.

De acuerdo con el consumo neto total, se procedió a calcular las proyecciones del caudal de diseño a partir del cual se rediseñaron las estructuras hidráulicas del acueducto.


**Tabla 49** Proyección de caudal de diseño.

Año	Población	Ctotal	QmD	QMD2	QMH
2014	3918	180	8,163	9,795	14,693
2026	4752	181	9,977	11,973	17,959
2039	5875	183	12,4633	14,956	22,434

Fuente: autoría propia.

### 4.3 CONCLUSIONES

- El sistema actualmente no presenta problemas en la fuente de abastecimiento principal “Potrero Grande”, puesto que se tiene una captación de  $20 \frac{l}{s}$  que es mayor a los caudales de diseño hallados en este estudio, para los que se tiene valores de  $12,44 \frac{l}{s}$  a excepción de las siguientes modificaciones para la adecuación de las estructuras:  
Al evaluar cada dimensión de cada estructura existente, se encuentra que el coagulador actual tiene una medida de largo de **11,9 m**, la cual de acuerdo a presente estudio y al caudal de diseño proyectado para una población estimada en el año 2039, su adaptación deberá ser de **12,4 m** de largo.
- La capacidad de captación del sistema a través de los vertederos frontales de la captación de Potrero Grande, es suficiente con respecto a la demanda de agua tenida en cuenta para los periodos evaluados
- La precipitación media se determinó a partir de las Isoyetas que generaban, con base en los registros de precipitación de las estaciones cercanas a la cuenca, su resultado anual es de **4817,8 mm**.
- La evapotranspiración, se estableció a partir del método de Turc, donde se determinó que **4167.623,91mm** de agua se transfieren de la superficie a la atmosfera
- La oferta hídrica de la cuenca representada en los aforos que se hicieron en la quebrada Potrero Grande es de **271,15 L**, lo cual es suficiente para abastecer a la cabecera municipal y a las veredas alledañas y no tener un impacto en la disminución del servicio.
- La oferta hídrica si cumple con la demanda de la población para el año 2039, por lo que no se requiere buscar una fuente alterna de abastecimiento para cubrir la calidad del servicio en el municipio de Choachí Cundinamarca.
- De acuerdo a los parámetros geomorfológicos de Choachí Cundinamarca, en su mayoría presenta pendientes dentro del rango 0.3 % dentro del casco urbano, sin embargo, en las zonas cercanas al cauce principal que ente caso es la quebrada Potrero Grande se presenta zonas escarpadas.

A close-up photograph of water splashing into a pool, creating a dynamic and textured scene. The water is captured in mid-air, with many small droplets and bubbles visible. The background is dark and out of focus, making the bright, white water stand out. The overall mood is fresh and energetic.

# Alternativas de diseño para la optimización del sistema de acueducto Veredal Tunjaque (La Calera, Cundinamarca)



## 5.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de acueducto son un conjunto de instalaciones, estructuras, maquinarias o equipos que permiten captar, conducir, acondicionar, almacenar y distribuir agua apta para el consumo humano, desde una fuente, en este caso superficial, hasta cada uno de los puntos de aprovechamiento de esta (Lara, Y. A., Amado, M. A. M., y Naranjo, L. A. M., 2013). Dichos sistemas en la actualidad son esenciales en la salubridad, siempre y cuando, cuenten con elementos de diseño adecuados, que brinden a la población un servicio de agua potable eficiente en cuanto a las variables cantidad, calidad y frecuencia.

A nivel mundial, el acceso a fuentes de agua mejoradas es menor en las áreas rurales en comparación con las áreas urbanas y 3 de cada 10 personas carecen de este recurso. Confirmando lo anterior, según la organización mundial de la salud de los 2100 millones de personas que no disponen de agua gestionada de forma segura, 844 millones no tienen tampoco un servicio básico de agua potable. (OMS, 2017).

En Colombia el desabastecimiento continúa, en vista de que para el área urbana el 97% accede a un suministro de agua potable mientras que en el área rural este disminuye a un 74% (FINDETER, 2017) creando un alcance limitado a comunidades de menos de 2.500 habitantes. Para el caso de Cundinamarca existe un total de 1340 acueductos veredales identificados, de los cuales solo 443 poseen concesión de aguas por la autoridad ambiental (Contraloría, 2016) generando así, una desar-

ticulación en materia de los parámetros hidráulicos y de calidad del agua de estos, para que puedan ser aprobados y tenidos en cuenta.

En este sentido, el sistema de acueducto veredal de Tunjaque (La Calera – Cundinamarca) simplemente cuenta con un tratamiento primario como lo es el desarenador y un sistema de filtración. Adicionalmente, se observa a simple vista la presencia de pérdidas de agua al tratarla y transportarla, y se identifican falencias en la construcción y operación de algunos de sus elementos, junto a la no existencia de otros que tienen gran influencia en brindar una buena calidad del agua. Por lo tanto, se hace necesario plantear alternativas de diseño que permitan la optimización del funcionamiento del sistema hidráulico y de calidad del agua de dicho acueducto desde la bocatoma hasta el tanque de almacenamiento, mediante cuatro fases.

En la primera, fase se realiza el análisis de la oferta y demanda de agua mediante un análisis hidrológico con representaciones gráficas en el programa ArcGIS. En la segunda fase, se realiza la verificación del funcionamiento de la planta de tratamiento enfocado en la calidad del agua, a través de análisis físicos, químicos y microbiológicos, algunos realizados *in situ* y en el laboratorio de la Universidad Libre, y otros obtenidos de los exámenes presentados por el laboratorio certificado Asebiol S.A.S. En la tercera fase, se realiza la identificación de las pérdidas presentes en el acueducto con sus causas mediante el cálculo del índice de agua no contabilizada. En la última fase se determinan las alternativas más adecuadas técnicamente para el mejoramiento de este sistema desde la bocatoma hasta el tanque de almacenamiento teniendo en cuenta las recomendaciones de los autores mencionados en el presente capítulo que mediante la práctica han demostrado la efectividad en los procesos, por último, se representan gráficamente los diseños de dichos elementos mediante el programa AutoCAD.

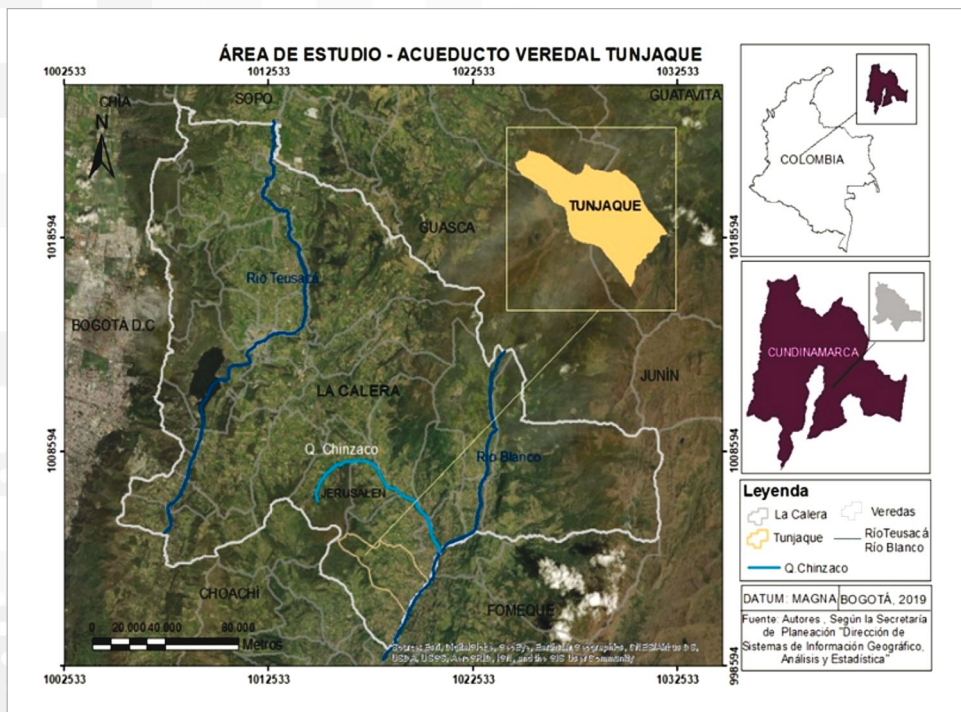
## 5.2 MARCO GEOGRÁFICO Y LEGAL

A continuación, se presentan los marcos geográfico y legal, aplicados a la zona de estudio y a los requerimientos aplicables al presente proyecto.

### 5.2.1 Marco geográfico

El municipio de la Calera se encuentra ubicado en la cordillera oriental de Colombia a 4° 43' 17" N y 73° 58' W. Limita al norte con los municipios de Sopo, Chía y Guasca, al sur con el Municipio de Choachí, Bogotá, y al oriente con el Municipio de Guasca. Cuenta con 32 veredas entre las cuales se encuentra la zona de estudio delimitada, Tunjaque. Se localiza a 2716 m.s.n.m con una temperatura promedio de 15°C y una precipitación anual de 935 mm. Su hidrografía pertenece a las Ver-

tientes del Magdalena y del Meta. Dos ríos surcan el municipio, el río Teusacá y el río Blanco (ORARBO, 2016). Para el caso de la quebrada Chinzaco cuya agua abastece a la población de Tunjaque y es la zona de estudio, esta desemboca en el río Blanco, el cual vierte sus aguas a la cuenca del río Negro y por último al río Meta. Lo anterior se evidencia en el Figura 40.



**Figura 40** Sitio de Estudio, Vereda Tunjaque - La Calera, Cundinamarca.

Fuente: autoría propia.

### 5.2.2 Marco legal

Según la Constitución Política de Colombia de 1991, en su artículo 366, el bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad, la solución de las necesidades insatisfechas de agua potable. Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación.

Por tal motivo, el presente proyecto pretende involucrar a la institución educativa en el marco del Plan Nacional de Desarrollo periodo 2018-2022, Pacto por Colombia, pacto por la equidad, específicamente en relación con el “Pacto por la calidad



y eficiencia de los servicios públicos” del presente plan, mediante la elaboración de alternativas que permitan el buen funcionamiento del acueducto Tunjaque (La Cadera - Cundinamarca) y así, aportar al cumplimiento de la meta nacional de alcanzar que 3 millones más de colombianos, cuenten con un servicio de agua potable en buenas condiciones.

En contexto de lo anterior, se siguen los requisitos técnicos que deben cumplir las obras para promover el buen funcionamiento del acueducto, señalados en la resolución 0330 de 2017, por la cual se adopta el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS. Lo anterior con el fin de cumplir con los capítulos dos y tres alusivos a las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano de la resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua de consumo humano.

Al ejecutar este proyecto, se debe tener en cuenta el decreto 1575 de 2007 que tiene el objeto de establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada, específicamente su artículo 9º alusivo a las obligaciones del prestador del servicio enfocadas en realizar el control de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano, como también de las características adicionales definidas en el gráfico de riesgo o lo exigido por la autoridad sanitaria de la jurisdicción, según se establezca en la reglamentación del presente decreto, para garantizar la calidad del agua para consumo humano en cualquiera de los puntos que conforman el sistema de suministro y en toda época del año.

### 5.3 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA

Para la estimación de la oferta, como afirman Senisterra, G. E., Vagaría, A. M. R., Gaspari, F. J., y Mazzucchelli, M. G. (2014), las características físicas de una cuenca hidrográfica son fundamentales en la descripción de la dinámica hídrica por lo que, generalmente, es el punto de partida para generar una idea integral sobre el funcionamiento del sistema.

Dentro de la metodología expuesta por Monsalve Sáenz, G. (1999) los cálculos de dichas características se realizan de la siguiente forma:

$$k_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación (25) Índice de compacidad ( $K_c$ )

Donde:

$P$  = Perímetro;  $A$  = Área

$$k_f = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación (26) *Factor de Forma (Kf)*

Donde:

$A$  = Área;  $L$  = Longitud

$$Dd = L/A$$

Ecuación (27) *Densidad de Drenaje (Dd)*

Donde:

$L$  = Longitud,  $A$  = Área.

Para el análisis de precipitación, se utiliza el método de Isoyetas por medio de la herramienta ArcGIS. Según Pizarro, R., Ramírez, C., y Flores, J. P. (2003) para su elaboración es necesario las mediciones de precipitación de los periodos deseados, la ubicación de las estaciones de precipitación normal, el material cartográfico, y el conocimiento espacial y atmosférico de las áreas consideradas.

GEASIG (2019) refiere que estas isolíneas representadas en el gráfico son curvas de nivel de igual precipitación, las cuales permiten estimar un valor en un lugar dado. Para estas isoyetas, son necesarios los datos de precipitación en tipo ráster de mínimo 3 estaciones, por consiguiente, se inserta una tabla en Excel con los datos de coordenadas y altura de cada una de dichas estaciones. Posteriormente para calcular las isoyetas se utiliza la interpolación, que requiere dirigirse a través de Arc-Toolbox < Spatial Analyst Tools < Interpolation < IDW.

Una vez representados los intervalos de las isolíneas mencionadas, se calculan las áreas de cada una y se procede a calcular la precipitación con la siguiente ecuación:

$$P \text{ media} = \frac{\sum(P \times A)}{\text{Área Total}}$$

Ecuación (28) *Precipitación media*

Según Calle, E. D., Rivera, H. G., Sarmiento, R. V., y Moreno, P. (2008) la oferta de agua se representa por los caudales promedio anuales, donde a partir de estos se extrae la curva de duración de caudales, que se construye con base en los registros de las estaciones hidrométricas que miden el flujo de agua de la fuente abastecedora.

Con el fin de determinar el caudal ofrecido por la quebrada Chinzaco se opta por recurrir a datos de caudales provenientes de la CAR, como dicha información en el

caso de la cuenca es escaza, se procede a realizar un método alterno utilizando la comparación con cuencas similares determinando las áreas y así estimar el valor a partir de los datos obtenidos para el río Teusacá.

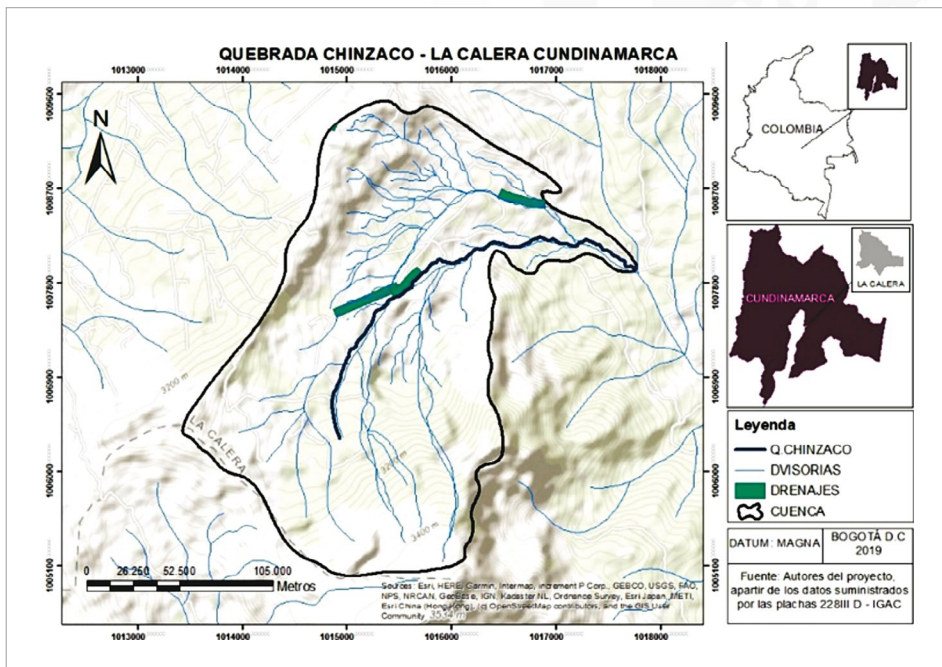
Para realizar la curva de duración de caudales se establece con base en el promedio de caudales sean diarios, mensuales, anuales etc., la frecuencia absoluta, acumulada y relativa teniendo como referencia lo expuesto por Monsalve Sáenz, G. (1999)

Dentro de los requisitos hidrológicos para la quebrada Chinzaco, que forma parte de la captación del acueducto veredal Tunjaque, se inicia delimitando la cuenca por medio del software ArcGIS versión 10.8 el cual permite estimar el área, perímetro y longitud de la quebrada como se muestra en la tabla 50 y en la Figura 41.

**Tabla 50** Características físicas Q. Chinzaco

Parámetro	Valor	Unidad
Área	10,005	Km <sup>2</sup>
Perímetro	15,329	Km
Longitud	4,35	Km

Fuente: autoría propia.



**Figura 41** Cuenca Q. Chinzaco - La Calera Cundinamarca.

Fuente: autoría propia.

A partir de los datos anteriores, utilizando la metodología anteriormente mencionada se determina el índice de compacidad, el factor de forma y densidad de drenaje así:

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 * \frac{10,005}{\sqrt{15,329}}$$

$$K_c = 1.36$$

Ecuación (29) Índice de compacidad - Factor de forma (Kc)

$$K_f = \frac{10,005}{4,35^2}$$

$$K_f = 0.53$$

Ecuación (30) Factor de Forma (Kf)

$$D_d = \frac{4.35}{10.005}$$

$$D_d = 0.43$$

Ecuación (31) Densidad de Drenaje (Dd)

La cual presenta para el caso de la quebrada Chinzaco, una forma de la cuenca Oval redonda - oval oblonga y moderadamente achatada.

A través de la herramienta Google Maps, se calcula la pendiente alta de la quebrada desde el punto de captación hasta el final del cauce, Figura 42, la cota más alta pertenece al nacimiento de la quebrada Chinzaco (3101m) y la cota más baja corresponde a la entrada de la bocatoma (2796,54m), dando como resultado:

$$S = \frac{3101 - 2796,54}{2796,54} = 10,88 \%$$

Ecuación (32) Pendiente



**Figura 42** Pendiente Q. Chinzaco - La Calera Cundinamarca

Fuente: autoría propia.

Para el análisis de precipitación con respecto a la quebrada Chinzaco, se escogen las estaciones de Torca, Santa Teresa y Edificio CAR (Tabla 51), donde se estima una precipitación media de 1081,6mm

**Tabla 51** *Precipitación Anual Estaciones Torca, Sta Teresa y Edificio CAR.*

Estaciones	Precipitación anual (mm)
Torca	1120,6
Santa Teresa	1034,6
Edificio CAR	1089,8

Fuente: autoría propia.

$$P \text{ media} = \frac{1120,6\text{mm} + 1034,6\text{mm} + 1089,8\text{mm}}{3} = 1081,6 \text{ mm}$$

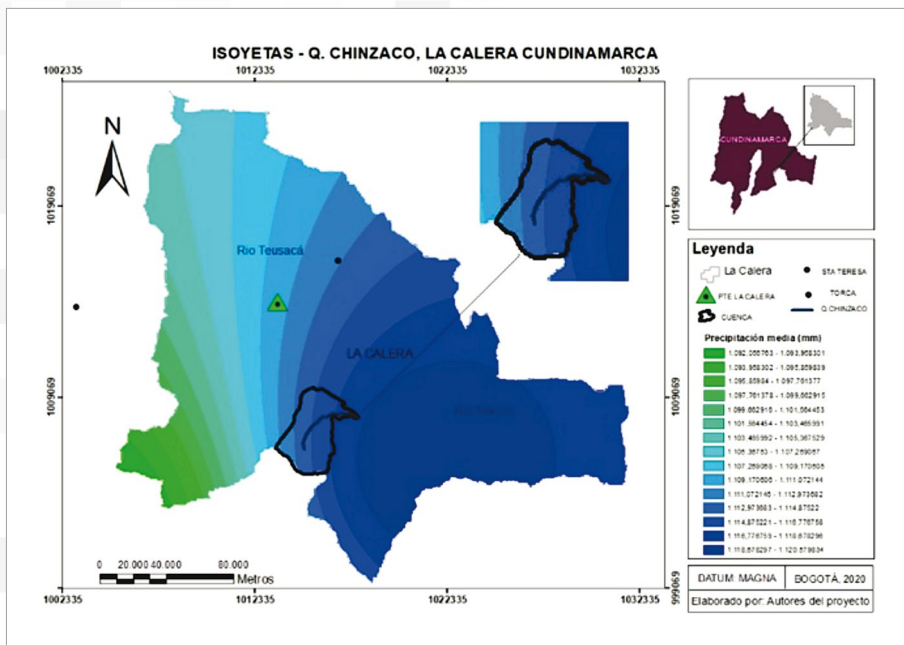
Ecuación (33) *Pendiente media*

Por medio del Figura 43 se logra identificar a través de las isoyetas, el área distribuida para la precipitación de la zona de estudio de la siguiente manera (Tabla 52).

**Tabla 52** *Estimación área de Isoyetas.*

Intervalo		Promedio	Área (km²)	P*A
1110.59	1110.96	1110.775	0.057027	63.3441659
1111.08	1114.24	1112.66	3.314.336	3687729094
1114.24	1117.41	1115.825	0.230625	257.337141
1117.41	1118.34	1117.875	6.290.863	7032398476
<i>Total</i>			9605199.29	1.072E+10

Fuente: autoría propia.



**Figura 43** Estimación de isoyetas Q. Chinzaco – La Calera Cundinamarca.

Fuente: autoría propia.

Se observa que, para el área de estudio, la precipitación se encuentra dentro del rango de 1110 a 1118.34 mm anual, la cual se encuentra dentro de un alto nivel con respecto a todo el municipio de La Calera.

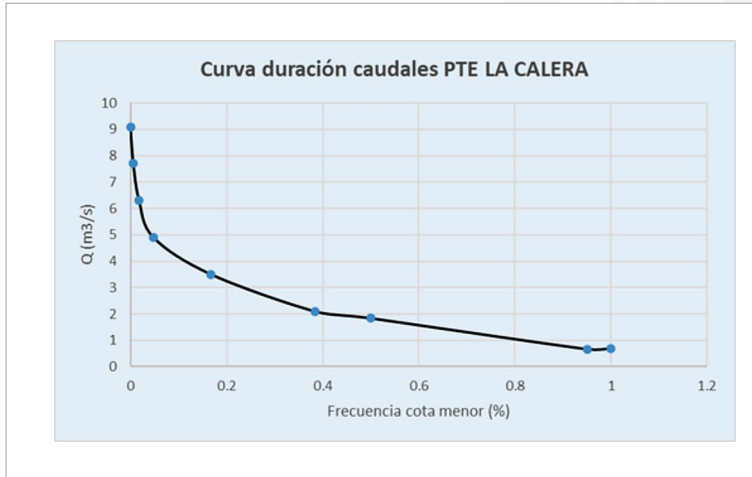
Posteriormente, para obtener la curva de duración de caudales, esta se elabora a partir de los datos de la estación PTE La Calera por la CAR, cuenca río Teusacá desde 1998 a 2017 como se muestra en la tabla 53.

**Tabla 53** Datos curva duración de caudales.

Rango de caudales	Q medios	Frecuencia	F. Absoluta	F. Relativa	F. Cota menor
0,0001	1,40	0,70	103,0	103,0	62%
1,40	2,80	2,10	36,0	139,0	22%
2,80	4,20	3,50	20,0	159,0	12%
4,20	5,60	4,90	5,0	164,0	3%
5,60	7,00	6,30	2,0	166,0	1%
7,00	8,40	7,70	1,0	167,0	1%
8,40	9,80	9,10	0,0	167,0	0%
<i>Total</i>			167,00		100%

Fuente: elaboración propia.

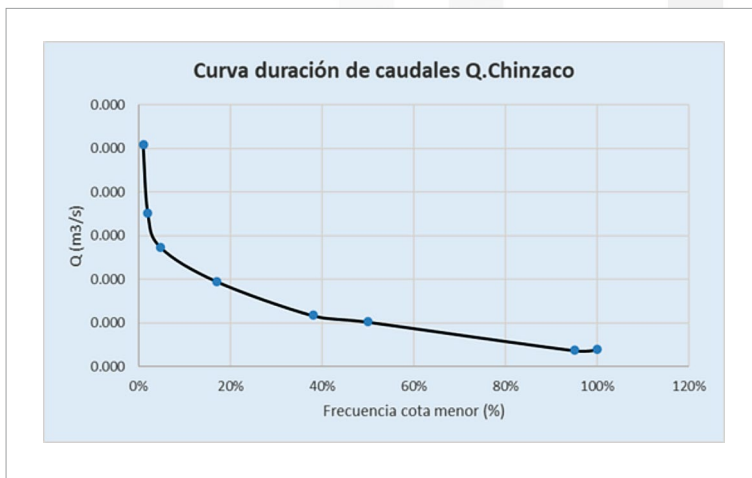
Se calcula la curva con los caudales medios en (m<sup>3</sup>/s), con respecto a la frecuencia cota menor en (%) como se muestra en la Figura 44.



**Figura 44** Curva Duración de Caudales PTE La Calera.

Fuente: autoría propia.

Para la obtención de la oferta con respecto a la quebrada Chinzaco, se realiza una comparación de áreas entre la cuenca del río Teusacá y la cuenca de la quebrada Chinzaco, en donde se obtiene una curva de la siguiente manera:



**Figura 45** Curva Duración de Caudales Q. Chinzaco

Fuente: elaboración propia.

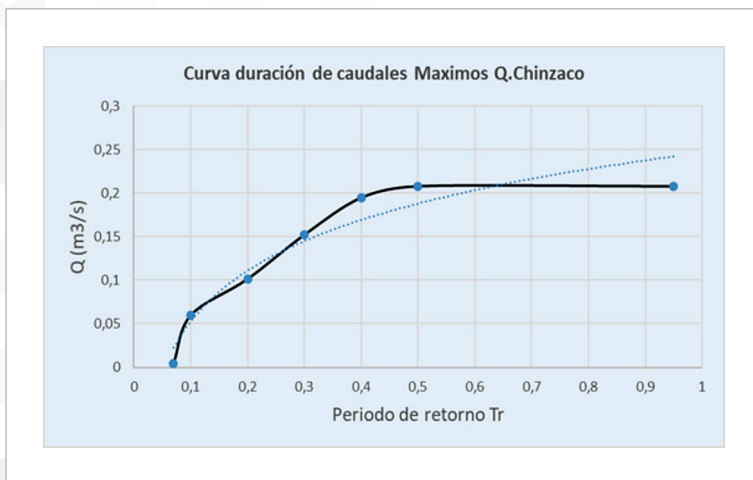
De la curva de duración de caudales se obtienen los valores de caudal que ofrece la quebrada representados en la Tabla 54:

**Tabla 54** Caudales Medios Q. Chinzaco.

F. Cota menor %	Q medios m <sup>3</sup> /s
100%	0,020
95%	0,019
50%	0,051
38%	0,059
17%	0,098
5%	0,137
2%	0,176
1%	0,254

Fuente: autoría propia.

A partir de la misma metodología se estiman los valores para los caudales máximos de la quebrada Chinzaco. Obteniendo de esta forma los valores de la Tabla 55 y de la Figura 46.



**Figura 46** Curva de Caudales Máximos Chinzaco.

Fuente: autoría propia.



**Tabla 55** Caudales Máximos Q. Chinzaco.

Tr	Q máx (m3/s)
95%	0,005
50%	0,060
40%	0,102
30%	0,152
20%	0,195
10%	0,208
7%	0,208

Fuente: autoría propia.

#### 5.4 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

“La estimación correcta de la demanda de agua potable representa una condición indispensable para la planeación y el diseño de los sistemas de suministro, que en gran medida determina las inversiones necesarias y calidad del servicio” (Tzatchkov, V. G., y Alcocer-Yamanaka, V. H., 2016, p.116). Uno de los primeros parámetros a tener en cuenta es la población de diseño, esta permitirá posteriormente calcular las dotaciones y el caudal a emplear en el dimensionamiento del sistema de potabilización.

Al analizar la demanda de agua de la vereda, se tiene en cuenta el crecimiento de la población para un periodo de 25 años y se realiza su respectiva proyección a través de los métodos estadísticos lineal, geométrico y logarítmico expresados en la tabla 56. Cabe aclarar, que los datos fueron procedentes del último dato de población establecido por el censo del DANE en el 2018 para el municipio de La Calera.

**Tabla 56** Métodos de proyección poblacional.

Descripción	Ítem	Ecuación
Método lineal: Se da un crecimiento lineal cuando el aumento de la población es constante e independiente del tamaño de esta	Método Lineal	$K_a = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{ci} - T_{uc}} * (T_f - T_{uc})$ <p> <math>K_a</math> = Pendiente de la recta  <math>P_{uc}</math> = Población último censo  <math>P_{ci}</math> = Población censo inicial  <math>T_f</math> = Año de la proyección  <math>T_{uc}</math> = Año del último censo                 </p>

Descripción	Ítem	Ecuación
<i>Método geométrico:</i> Este método se utiliza cuando la población no ha alcanzado su desarrollo y crecen de forma uniforme a los porcentajes anteriores	Método Geométrico	$P_f = P_{UC} * (1 + r)^{T_f - T_{uc}}$ $P_f = \text{Población proyectada}$ $r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{T_{uc} - T_{ci}}} - 1$ $r = \text{Tasa de crecimiento anual}$
<i>Método logarítmico:</i> Es utilizado para poblaciones que presenten un desarrollo apreciable con abundantes áreas de expansión	Método Logarítmico	$K_g = \frac{\text{Ln}P_{cp} - \text{Ln}P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$ $K_g = \text{Constante}$ $P_{cp} = \text{Censo posterior}$ $P_{ca} = \text{Censo anterior}$ $T_{cp} = \text{Año censo posterior}$ $T_{ca} = \text{Año censo anterior}$ $P_f = P_{ci} * e^{K_g(T_f - T_{ci})}$ $P_f = \text{Población proyectada}$

Fuente: Métodos de proyección descritos por López Cualla, R. A. (2003). P.39; Corcho Romero, F. y Duque, J. I. (2005). P. 16 y Poveda M., Herrera C. (2016). Cap. 5.3.5.7.

Posteriormente para la proyección del consumo, se realizan los cálculos de los caudales de demanda, caudal medio diario (*Qmd*), caudal máximo diario (*QMD*) y caudal máximo horario (*QMH*) utilizando la metodología expuesta por Cualla, R. A. (2003) de la siguiente forma:

$$\text{Consumo total} = \frac{\text{Consumo neto}}{1 - \%P}$$

Ecuación (34) *Consumo neto*

*Consumo neto* = Consumo neto obtenido de la Resolución 0330 de 2017.

$1 - \%P$  = Disminución del índice de pérdidas obtenido de la Resolución 0330 de 2017.

Para el caudal medio diario:

$$QmD = \frac{\text{Dot. Bruta} \left( \frac{L}{\text{Hab}} * \text{día} \right) * \text{Población(hab)}}{86400}$$

Ecuación (35) *Caudal medio diario*

Para el caudal máximo diario:

$$QMD = k_1 * QmD$$

Ecuación (36) Caudal maximo diario

$k_1$  = Coeficiente obtenido de la resolución 0330 de 2017

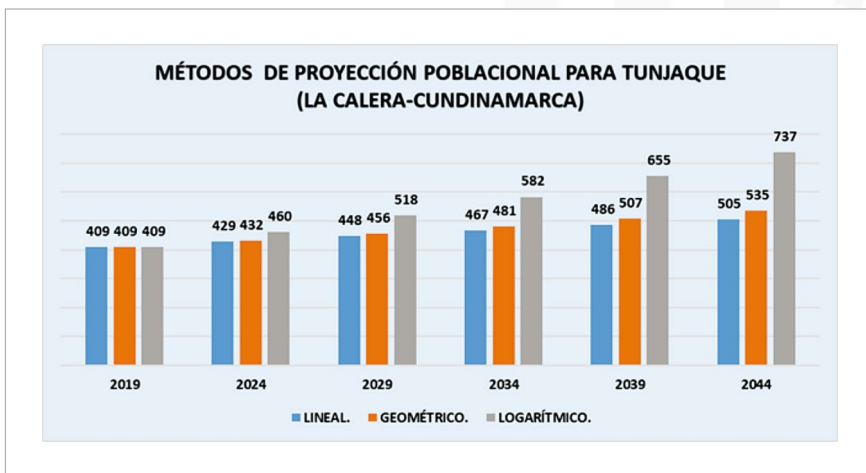
Para el caudal máximo horario:

$$QMH = k_2 * QMD$$

Ecuación (37) Caudal maximo horario

$k_2$  = Coeficiente obtenido de la Resolución 0330 de 2017.

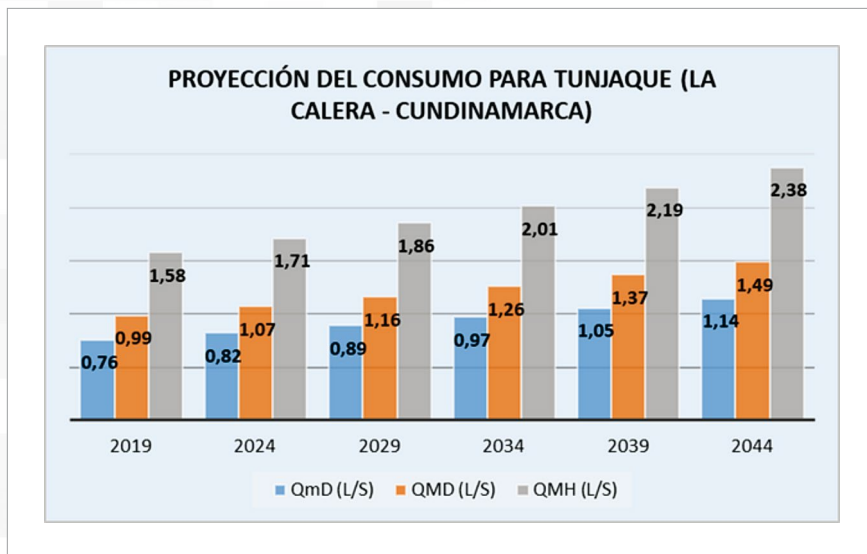
Se realiza la proyección poblacional para el año 2044 a través de los métodos anteriormente mencionados, de los cuales se obtienen los resultados demostrados en la Figura 47.



**Figura 47** Proyección Poblacional Tunjaque.

Fuente: autoría propia.

El resultado del promedio de los anteriores métodos arroja un valor de 593 habitantes para el año 2044. Teniendo en cuenta la altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida, la cual es de 2746 msnm y su nivel de complejidad que en este caso es medio, la dotación neta máxima es de 120 L/hab\*día, con la cual se realiza una proyección del consumo obteniendo los valores de Qmd, QMD y QMH presentados en la Figura 48.



**Figura 48** *Proyección del consumo Tunjaque.*

Fuente: autoría propia.

#### 5.4.1 Encuesta a los usuarios

Se realiza una encuesta a una muestra de la cantidad de usuarios de la vereda, determinada mediante el método expuesto por Morillas, A. (2007) en la tabla 57, con el fin de verificar la opinión de los usuarios acerca de la calidad actual del servicio ofrecido por el acueducto Tunjaque.

**Tabla 57** *Tamaño de muestra encuesta a usuarios.*

criterio	Ecuación
Determinación del tamaño de muestra de usuarios del acueducto Tunjaque	$n = \frac{N z_{1-\alpha/2}^2 pq}{(N - 1)\epsilon^2 + z_{1-\alpha/2}^2 pq}$ <p> <i>n</i>: Muestra  <i>N</i>: Tamaño de la población  <i>z</i>: Valor de la tabla de probabilidad según la campana de Gauss para un 95% de confiabilidad es 1.96  <i>p</i>: Proporción esperada es del 50%  <i>ε</i>: Error de precisión (5%)  <i>q</i>: Es (1-0.05= 0.95) se le resta el porcentaje de error.                 </p>

Fuente: Morillas, A. 2007.

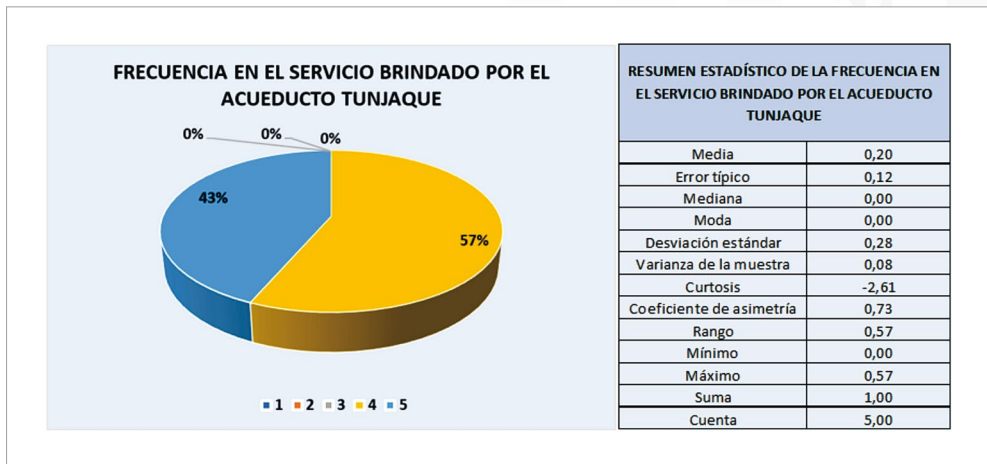
Las preguntas realizadas en la encuesta son las que se presentan en la tabla 58.

**Tabla 58** Preguntas para encuesta a usuarios.

Encuesta realizada a usuarios	
1	¿Cómo califica de 1 a 5 la calidad del servicio que el acueducto le presta a usted y a su comunidad en cuanto a la frecuencia con que el agua llega a su hogar?
2	¿La cantidad de agua potable que llega a su casa es suficiente para suplir las necesidades básicas de su familia?
3	¿Qué tan limpia es el agua que usted consume en su hogar?
4	¿Alguien en su familia ha presentado problemas de salud debido al consumo de agua en su vivienda?
5	¿Tiene alguna queja o reclamo sobre el suministro de agua que el acueducto le brinda?

Fuente: autoría propia.

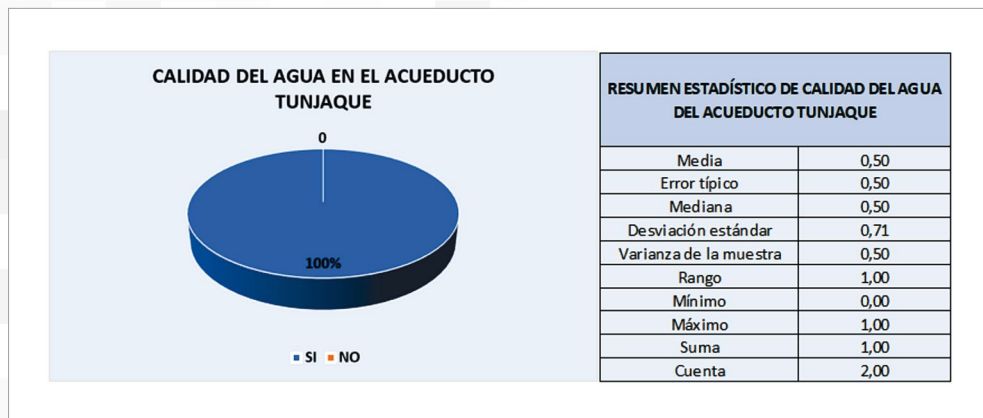
La población para la vereda Tunjaque, en el 2019 era de 409 habitantes, por lo tanto, reemplazando en el método de Morillas, A. (2007) se requiere un tamaño de muestra de 46 encuestas a realizar, de las cuales se obtienen los resultados mostrados en la Figura 49.



**Figura 49** Frecuencia del servicio brindado según los usuarios del acueducto con su respectivo resumen estadístico.

Fuente: autoría propia.

La siguiente figura representa la pregunta: “¿Cómo califica de 1 a 5 la calidad del servicio que el acueducto le presta a usted y a su comunidad en cuanto a la frecuencia con la que el agua llega a su hogar?”. El 100% de la muestra de población varía entre 4 y 5, por lo tanto, los usuarios tienen una percepción positiva hacia la frecuencia del servicio.



**Figura 50** Calidad de agua según los usuarios del sistema de acueducto con su respectivo resumen estadístico.

Fuente: autoría propia.

La Figura 50 sintetiza las demás preguntas de la encuesta realizada a los usuarios, de forma tal que el 100% de la población está satisfecho con la calidad de agua en el servicio.

## 5.5 FUNCIONAMIENTO PLANTA DE TRATAMIENTO

Mediante los datos obtenidos de calidad de agua del laboratorio Asebiol S.A.S y las mediciones realizadas in situ con un multiparámetro y en el laboratorio de la Universidad Libre con un pH metro y un turbidímetro, se identifica la calidad del agua que ofrece el acueducto en cuanto a los parámetros de temperatura, turbiedad, pH, conductividad, color aparente, olor, sabor y coliformes totales.

En la planta de tratamiento actual del acueducto Tunjaque se cuenta simplemente con cuatro filtros instalados (figura 51), que funcionan a presión y están diseñados para mantener un flujo con tasa constante, de los cuales solo uno se encuentra en funcionamiento ya que en los otros tres el caudal no es suficiente para permitir una adecuada filtración y se presentan dificultades para su lavado, debido a que al hacerlo de forma ascendente los lechos filtrantes de arena y carbón activado se mezclan.



**Figura 51** Sistema de filtración actual del acueducto Tunjaque.

Fuente: autoría propia, 2018.

Nota. Fotografía tomada a los filtros del acueducto en la segunda visita a la zona de estudio, año 2018.

Para esta planta de tratamiento se diseña un tipo de planta de filtración directa cambiando el sistema de filtros actual y adicionándole un mecanismo de coagulación mediante mezcla rápida, un floculador como mezcla lenta, un sedimentador para las partículas floculentas y un medio de desinfección.

Para el diseño de estas estructuras que promuevan el mejoramiento del sistema de acueducto, se toman como referencia los requisitos exigidos por la resolución 0330 de 2017 y las recomendaciones de varios autores que a través de la práctica han demostrado la efectividad en estos procesos. Los respectivos diseños se realizan en el programa AutoCAD y se muestran en el presente capítulo.

### 5.5.1 Calidad del agua en el sistema

De las muestras de agua tomadas en campo y analizadas in situ y en el laboratorio de la Universidad Libre en el año 2018 como se ilustra en la Figura 52, junto a los resultados de calidad del agua entregados por el laboratorio certificado Asebiol S.A.S en el mismo año, en la tabla 59, se presentan los datos de temperatura, color aparente, olor, sabor, turbiedad, pH, conductividad y coliformes totales obtenidos.



**Figura 52** Análisis de parámetros de agua in situ y en laboratorio de la Universidad Libre.

Fuente: autoría propia.

**Tabla 59** Análisis físicos, químicos y microbiológicos del agua.

Análisis	Resultado	Unidad de medida
Temperatura	15	° C
Color aparente	2,3	UPC
Olor y sabor	Aceptable	Aceptable
pH	6,5	Unidades
Turbiedad	0,53	UNT
Conductividad	17,33	$\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$
Coliformes totales	15	UFC/100 ml

Fuente: autoría propia.

De los resultados anteriores se deduce que el pH del agua cumple con el rango establecido por la resolución 2115 de 2007, el cual debe estar entre 6,5 y 9 para aguas de consumo humano, al igual la turbiedad que debe ser inferior a 2 UNT, el color aparente, cuyo nivel máximo es de 15 UPC, la conductividad también ya que esta tiene un valor máximo aceptable de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pero los coliformes totales no cumplen con lo estipulado debido a que su valor debe ser de 0 UFC/100ml. Por lo tanto, es necesario diseñar un sistema de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección que permitan la remoción de microorganismos y un tratamiento efectivo.

### 5.5.2 Pérdidas de agua en el sistema

Para analizar las pérdidas de agua, técnicas y comerciales, se evalúa el índice de agua no contabilizada o también conocido como índice de pérdidas totales. Como menciona Salazar Adams, A., y Lutz Ley, A. N. (2015) dichas pérdidas se clasifican en pérdidas reales que se refiere a las pérdidas físicas del agua, es decir el volumen perdido por fugas, roturas y desbordamientos, y las pérdidas aparentes las cuales se



refieren a los consumos no autorizados y todo tipo de imprecisiones de la medición de producción y consumo de agua.

Según el Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál. (2010) “para realizar el cálculo de las pérdidas, es utilizado el índice de agua no contabilizada (IANC), que relaciona el volumen total de agua suministrada a las redes con el volumen total de agua facturado a los usuarios de éstas en un periodo determinado, expresado en porcentaje”. Para el acueducto de Tunjaque, se toma el caudal de aforo determinado en campo y el promedio de consumo de los suscriptores de dicho acueducto, el cual es expresado mediante la siguiente ecuación.

$$\text{IANC} = \frac{\text{Volumen producido} - \text{Volumen facturado}}{\text{Volumen producido}}$$

Ecuación (38) *Índice de agua no contabilizada*

Se calcula según el IANC anteriormente mencionado. Siendo el caudal de entrada 8,32 L/s, y el caudal de salida el promedio de consumo por los 114 usuarios para un valor de 4,56 L/s.

$$\text{IANC} = \frac{8.32 \frac{\text{L}}{\text{s}} - 4.56 \frac{\text{L}}{\text{s}}}{8.32 \frac{\text{L}}{\text{s}}} = 0.45 \text{L/s}$$

Ecuación (39) *Promedio de consumo*

El porcentaje de pérdidas es igual al 45%, que se refleja debido a que actualmente el sistema de acueducto Tunjaque no cuenta con macromedidor y micromedidores suficientes. Razón por la cual, se propone para la disminución de dichas pérdidas la instalación de los medidores, pues estos permiten llevar un registro de los consumos y es requerido dentro de la información ante el Sistema Único de Información (SIU).

Adicionalmente estas pérdidas técnicas se pueden evidenciar en las estructuras como el desarenador y las pérdidas comerciales con una conexión clandestina que se presenta en la salida de la zona de los filtros de la planta de tratamiento (figuras 53 y 54).



**Figura 53** Conexión clandestina en la salida de los filtros.

Fuente: autoría propia.



**Figura 54** Presencia de pérdidas de agua en el desarenador actual de Tunjaque.

Fuente: autoría propia, 2017.

*Nota: Imágenes tomadas en la primera visita que se realiza a la zona de estudio, año 2017.*

Por otra parte, con la implementación de la PTAP y todo el sistema diseñado correctamente, el estado de funcionamiento será más cercano al previsto en diseño, y en consecuencia más próximo al óptimo, que sería de un valor máximo de 25% en pérdidas como lo sugiere la norma. En este sentido se mejorará su eficacia y eficiencia global, y se alargará su vida útil.

### 5.5.3 Diseño del sistema de acueducto

#### 5.5.3.1 Bocatoma

Según Corcho, F. y Duque, J. (2005), las obras de captación, como las estructuras que van directamente en la fuente superficial seleccionadas con el fin de captar agua para una red de acueducto, son en esencial las primeras obras en el diseño del sistema y depende a partir de estas, la eficiencia de suministrar a la comunidad agua potable (p. 37).

Con el fin de verificar el diseño actual de la bocatoma se opta por aplicar las ecuaciones de diseño de la lámina de agua ( $H$ ) y la velocidad del agua al pasar sobre la rejilla ( $V$ ) la cual permite identificar si el diseño de esta es el adecuado. Dichas ecuaciones se presentan a continuación:

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

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

De los datos obtenidos en campo mediante los aforos realizados, como se muestra tanto en la Figura 55 como en la Figura 56, se permite verificar el diseño actual de la bocatoma obteniendo los valores de la tabla 60.



**Figura 55** Bocatoma actual del acueducto Tunjaque.

Fuente: autoría propia.



**Figura 56** Aforo en la Bocatoma del acueducto Tunjaque.

Fuente: autoría propia.

**Tabla 60** Diseño de presa de bocatoma.

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Caudal	Q	0,0016	M <sup>3</sup> /S
Longitud	L	0,5	M
Profundidad	H	0,014	M
Velocidad de la quebrada sobre la presa	V	0,221	M/S

Fuente: autoría propia.

Según la tabla anterior, la velocidad de la quebrada Chinzaco sobre la presa es inferior al rango establecido por López Cualla, R. A. (2003) el cual considera que no debe ser mayor ni menor a 0,3 m/s y 3,0 m/s. Dado que es una bocatoma de dimensiones tan reducidas, este parámetro no la afecta y por lo tanto no requiere de un nuevo diseño. Adicionalmente la presente bocatoma es de tipo bocatoma de fondo, la cual se emplea para la captación de pequeñas cantidades de agua en quebradas en las que la lámina de agua en épocas de verano se reduce considerablemente, por lo tanto, esta estructura se acomoda de la forma más precisa a la forma del lecho de

la quebrada procurando que en la época de caudal mínimo la totalidad del caudal pase sobre la rejilla (Rincón Pulgar, R., 2004)

Dentro de las recomendaciones para el cumplimiento de la normativa, es necesario disponer de medios de protección y cercado que eviten el ingreso de personas no autorizadas, así como también la limpieza de dicha estructura para una mayor efectividad del sistema.

### 5.5.3.2 Desarenador

El desarenador actual solo cuenta con un módulo, por lo tanto, se diseña una estructura con dos módulos con el fin de no interrumpir el proceso de tratamiento en caso de requerir mantenimiento en alguno de ellos. Se identifica la no existencia de una estructura de aquietamiento y distribución de caudal en la zona de transición aducción y entrada al desarenador, situación que según Monsalve, E., León, P. y Lozano, G. (2010) provoca el impacto del agua contra la pantalla deflectora convirtiendo el flujo laminar en flujo turbulento, dando paso a una disminución de la eficiencia en la sedimentación, por lo tanto, se diseña este sistema teniendo en cuenta la teoría de la sedimentación expuesta por Stokes junto a las recomendaciones expuestas por López Cualla, R. A. (2003) y la resolución 0330 de 2017. Por otra parte, se evidencia la falta de un cerramiento que evite el ingreso de personas no autorizadas o animales como se muestra en la Figura 57.



**Figura 57** Desarenador actual del acueducto Tunjaque.

Fuente: autoría propia, 2018.

Nota. Fotografía tomada al desarenador en la segunda visita a la zona de estudio, año 2018.

Para el diseño de este elemento se emplea el QMD con un valor de 0,0015 m<sup>3</sup>/s y el QmD igual a 0,0011 m<sup>3</sup>/s, obtenidos de la proyección del consumo para el año 2044, la temperatura ambiente del agua, (T), es de 15°C, el peso específico de la arena, (ρ<sup>s</sup>), es de 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Se elige un desarenador de grado con un porcentaje de remoción de 75%, por lo tanto, se obtiene un número de Hazen de 3. Para el cálculo de las dimensiones del desarenador se asigna una relación L/B igual a 4 y una profundidad útil de sedimentación, (H), de 1,6 m. Aplicando la Ley de Stokes se tiene una velocidad de sedimentación efectiva de la partícula de:

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{\rho_s - \rho}{\mu} * d^2$$

$$V_s = \frac{981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}{18} * \frac{\left(2,65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}{0,0114 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}} * 0,005^2 \text{cm} = 0,19 \text{ cm/s}$$

Ecuación (40) *Velocidad de sedimentación*

El tiempo de sedimentación (t<sub>1</sub>) será:

$$t = \frac{H}{V_s} = \frac{160 \text{ cm}}{0,19 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 815 \text{ s}$$

Ecuación (41) *Tiempo de sedimentación*

Con este, el tiempo de retención hidráulico será:

$$\theta = 3,0 * t = 3 * 815 \text{ s} = 2446 \text{ s} = 0,67 \text{ horas} \approx 1 \text{ hora}$$

Ecuación (42) *Tiempo de retención hidraulico*

Dicho tiempo de retención de las partículas muy finas no debe ser inferior a 20 minutos, por lo tanto, el valor obtenido cumple con lo estipulado por la norma. El volumen del tanque de sedimentación es:

$$V = \theta * QmD = 2446 \text{ s} * 0,0011 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,79 \text{ m}^3$$

Ecuación (43) *Volumen del tanque de sedimentación*

Con este se halla el área superficial:

$$A_s = \frac{V}{H} = \frac{2,79 \text{ m}^3}{1,6 \text{ m}} = 1,74 \text{ m}^2$$

Ecuación (44) *Área superficial*

Teniendo en cuenta una relación L/B de 4, el ancho, (B), el largo (L) del desarenador serán:

$$B = \sqrt{\frac{A_S}{4}} = \sqrt{\frac{1,74 \text{ m}^2}{4}} = 0,66 \text{ m}$$

$$L = 4 * B = 4 * 0,66 \text{ m} = 2,64 \text{ m}$$

Ecuación (45) Ancho y largo del desarenador

La carga hidráulica superficial (q) será de:

$$q = \frac{QmD}{A_S} = \frac{0,011 \text{ m}^3}{1,74 \text{ m}^2} = 6,5 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{s}} = 56 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{d}}$$

Ecuación (46) Carga hidráulica superficial

Se recomienda que la carga hidráulica se encuentre entre 15 y 80  $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{d}}$ , por lo tanto, el diseño cumple y esta es igual a la velocidad de sedimentación en la partícula crítica  $V_0$  en condiciones teóricas (López Cualla, R. A. 2003):

$$V_0 = 0,065 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\frac{V_S}{V_0} = \frac{0,19 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{0,065 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 3$$

Ecuación (47) Velocidad de sedimentación partícula critica

Según la resolución 0330 de 2017, la relación  $V_S/V_0$  debe ser inferior a 20, por lo tanto, el diseño cumple con esta condición. La velocidad horizontal, ( $V_h$ ), en el sistema es:

$$V_h = \frac{V_0 * L}{H} = \frac{0,065 \frac{\text{cm}}{\text{s}} * 264 \text{ cm}}{160 \text{ cm}} = 0,10 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0,0010 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ecuación (48) Velocidad horizontal

Debido a que se trata de la sedimentación de arenas por acción de la gravedad  $k = 0,04$  y  $f = 0,03$ , entonces la velocidad de arrastre de la partícula es:

$$V_r = \sqrt{\frac{8k}{f} g(\rho_s - \rho)d}$$

$$V_r = \sqrt{\frac{8 * 0,04}{0,03} * 981 * \left(2,65 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}\right) * 0,005 \text{ cm}} = 9,29 \frac{cm}{s} = 0,09 \frac{m}{s}$$

Ecuación (49) *Velocidad de arrastre*

Según la resolución 0330 de 2017, la velocidad horizontal debe ser menor que la velocidad de arrastre de las partículas, con el fin de evitar la resuspensión del sedimento, por lo tanto, el diseño cumple con este parámetro.

Debido a que el desarenador debe contar con un sistema de paso directo con la capacidad para operar el caudal máximo diario del año 2044 más el consumo de la planta de tratamiento cuando la estructura esté en limpieza, se obtienen las siguientes condiciones de operación de los módulos:

**Tabla 61** *Condiciones de operación de los módulos del desarenador.*

Condición	Valor
Caudal de operación 1	$7,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{mD\_2019}$	
$\theta_1$	1,03 horas
$q_1$	$37,45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{d}}$
Consumo PTAP	$5,72 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
Caudal de operación 2	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{MD+PTAP}$	
$\theta_2$	0,52 horas $\approx$ 1 hora
$q_2$	$73,73 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 * \text{d}}$

Fuente: autoría propia.

Al hallar las dimensiones del vertedero de salida del desarenador se tiene:



$$H_v = \left( \frac{Q_m D}{1,84 * B} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{1,14 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{1,84 * 0,66 \text{ m}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,010 \text{ m}$$

$$V_v = \frac{Q_m D}{B * H_v} = \frac{1,14 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{0,66 \text{ m} * 0,010 \text{ m}} = 0,18 \text{ m/s}$$

$$X_s = 0,36(V_v)^{\frac{2}{3}} + 0,60H_v^{\frac{4}{7}} = 0,36 \left( 0,18 \frac{m}{s} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,60 \left( 0,18 \frac{m}{s} \right)^{\frac{4}{7}} = 0,16 \text{ m}$$

$$L_v = X_s + 0,1 = 0,16 \text{ m} + 0,1 = 0,26 \text{ m}$$

Ecuación (50) Dimensiones del vertedero

Donde

$H_v$  = Altura de la lámina de agua sobre el vertedero;  $V_v$  = Velocidad del agua sobre la cresta del vertedero;  $X_s$  = Alcance horizontal de la vena vertiente;  $L_v$  = Longitud del vertedero.

$$\frac{H}{2} = \frac{1,6 \text{ m}}{2} = 0,8 \text{ m}$$

Ecuación (51) Profundidad pantallas de entrada y salida del desarenador

$$\frac{L}{4} = \frac{2,64 \text{ m}}{4} = 0,66 \text{ m}$$

Ecuación (52) Distancia desde la cámara de quietamiento hasta la pantalla de entrada

$$15 * H_v = 15 * 0,010 = 0,14 \text{ m}$$

Ecuación (53) Distancia de la pantalla de salida al vertedero de salida

### 5.5.3.3 Cámara de quietamiento

Para el diseño de la cámara de quietamiento, se adopta un largo  $L_e = 0,28 \text{ m}$  y se obtienen las siguientes dimensiones:

$$\text{Profundidad} = \frac{H}{3} = \frac{1,6 \text{ m}}{3} = 0,53 \text{ m}$$

Ecuación (54) Profundidad

$$\text{Ancho} = \frac{B}{3} = \frac{0,66 \text{ m}}{3} = 0,22 \text{ m}$$

Ecuación (55) Ancho

Para el diseño del rebose de la cámara de aquietamiento se tiene en cuenta el aforo realizado en campo para el caudal de la tubería  $Q_0 = 1,62 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , el caudal  $Q_{mD_{2044}} = 1,14 \times 10^{-3}$  obteniendo como resultado un caudal de excesos de:

$$Q_{\text{Excesos}} = Q_0 - Q_{mD_{2044}} = 1,62 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} - 1,14 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 4,78 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación (56) Caudal de excesos

La altura del vertedero ( $H_e$ ), la velocidad en la cresta del vertedero ( $V_e$ ) y el alcance horizontal de la vena vertiente ( $X_s$ ), dan como resultado:

$$H_e = \left( \frac{Q_{\text{Excesos}}}{1,84 * L_e} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{4,78 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,84 * 0,28 \text{ m}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,00951 \text{ m}$$

$$V_e = \frac{Q_{\text{Excesos}}}{H_e * L_e} = \frac{4,78 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,00951 \text{ m} * 0,28 \text{ m}} = 0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$X_s = 0,36(V_e)^{\frac{2}{3}} + 0,60H_e^{\frac{4}{7}} = 0,36 \left( 0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,60(0,00951 \text{ m})^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0,16 \text{ m}$$

#### 5.5.3.4 Zona de lodos

Para esta zona se asigna una relación de profundidad de lodos de 10 m, con la cual la profundidad máxima será:

$$\frac{L}{10} = \frac{2,64 \text{ m}}{10} = 0,26 \text{ m}$$

Ecuación (57) Profundidad máxima

Debido a que esta no se encuentra dentro del rango sugerido por López Cualla, R. A. (2003) entre 0,75 y 1,5 m, se adopta una profundidad máxima de 1 m y una profundidad mínima de 0,8 m, con lo cual al hallar las pendientes se obtiene:

$$\frac{L}{3} = \frac{2,64 \text{ m}}{3} = 0,88 \text{ m}$$

Ecuación (58) Distancia desde el punto de salida a la cámara de aquietamiento

$$\frac{2 * L}{3} = \frac{2 * 2,64 \text{ m}}{3} = 1,76 \text{ m}$$

Ecuación (59) Distancia desde el punto de salida al vertedero de salida

$$\frac{1 \text{ m} - 0,8 \text{ m}}{0,66 \text{ m}} = 0,30 = 30\%$$

Ecuación (60) Pendiente transversal obtenida

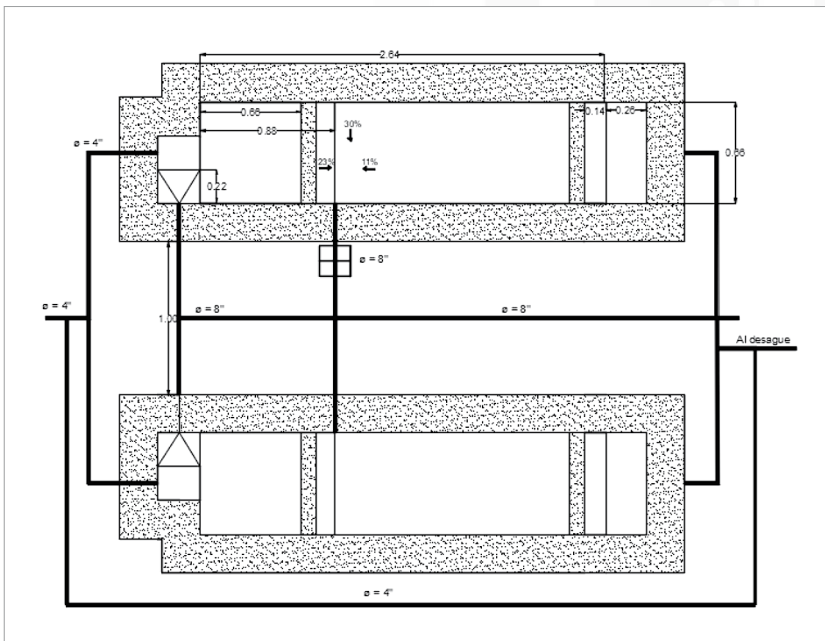
$$\frac{0,2 \text{ m}}{0,88 \text{ m}} = 0,23 = 23\%$$

Ecuación (61) Pendiente longitudinal en (L/3)

$$\frac{0,2 \text{ m}}{1,76 \text{ m}} = 0,11 = 11\%$$

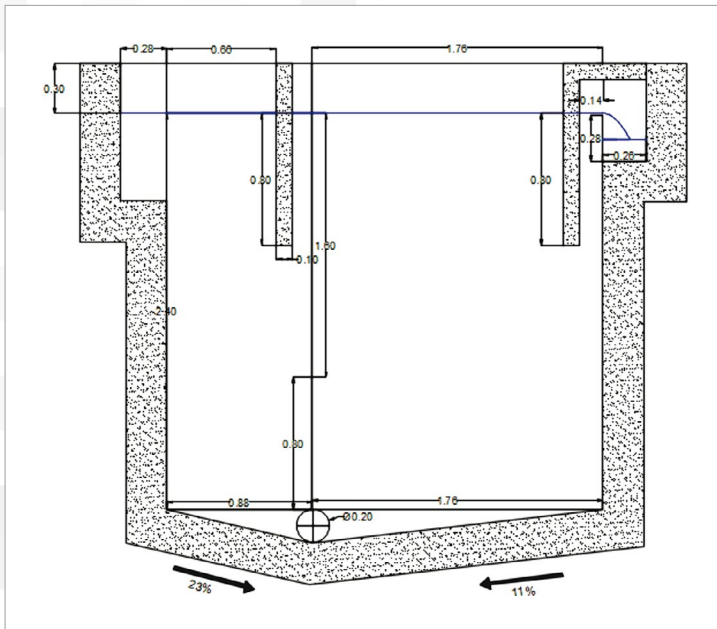
Ecuación (62) Pendiente longitudinal en (2L/3)

Según la norma, en la zona de lodos se debe contar con pendientes superiores al 10%, con el fin de obtener una eficiente evacuación del producto desarenado, por lo tanto, el diseño cumple con las especificaciones. A continuación, se presenta el esquema del diseño del desarenador en su vista en planta, longitudinal y transversal (figuras 58 a 60).



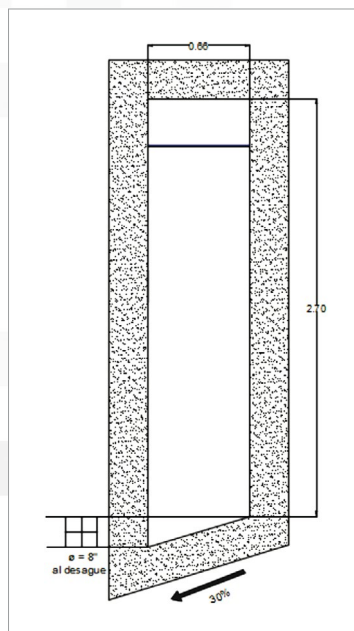
**Figura 58** Vista planta del desarenador.

Fuente: autoría propia.



**Figura 59** Vista longitudinal del desarenador.

Fuente: autoría propia.



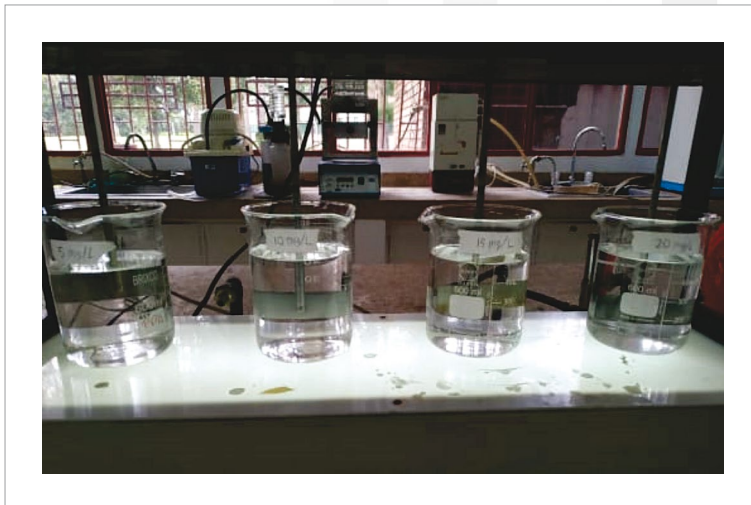
**Figura 60** Vista transversal Del desarenador

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.5 Coagulación

La coagulación es el proceso por el cual ocurre una desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Teniendo en cuenta el caudal a tratar ( $QMD$ ), se adiciona la dosis de coagulante Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ , que produzca dicha reacción. Esta dosis se obtiene mediante un ensayo de laboratorio denominado Prueba de jarras, el cual consiste en agregar distintas cantidades de coagulante a vasos de precipitado y ubicarlos en un floculador a escala de laboratorio, con el fin de simular las condiciones de agitación y tiempos de retención de la planta de tratamiento, para luego escoger la dosis que mejores resultados representa en cuanto a turbidez y valor de pH (Robles, C., Caputo, R y Sánchez, A., 2012). Según Chow, V. T. (1994) para mezclar dicho coagulante de forma rápida, el uso de un vertedero es un método simple, pero causa unas pérdidas de altura relativamente altas, por lo tanto, se diseña un mezclador hidráulico, una canaleta Parshall, teniendo en cuenta las dimensiones recomendadas por el mismo autor (p. 74) y los criterios de diseño establecidos por la norma, con el propósito de realizar una mezcla rápida y permitir una dispersión adecuada en el proceso.

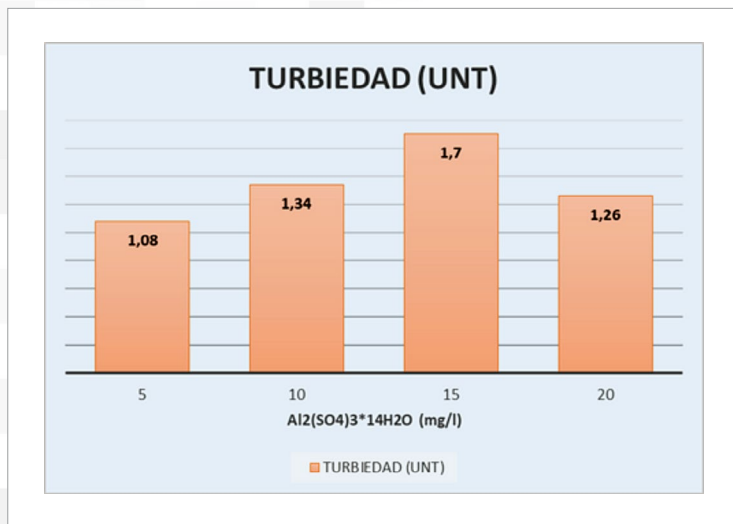
Inicialmente se halla la dosis de coagulante realizando una prueba de jarras como se muestra en la Figura 61, utilizando  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  al 1%, es decir 10g/l, de la cual se obtienen los resultados de turbiedad y pH que varían con respecto a la dosis de coagulante empleada, presentados en las figuras a continuación:



**Figura 61** Prueba de jarras.

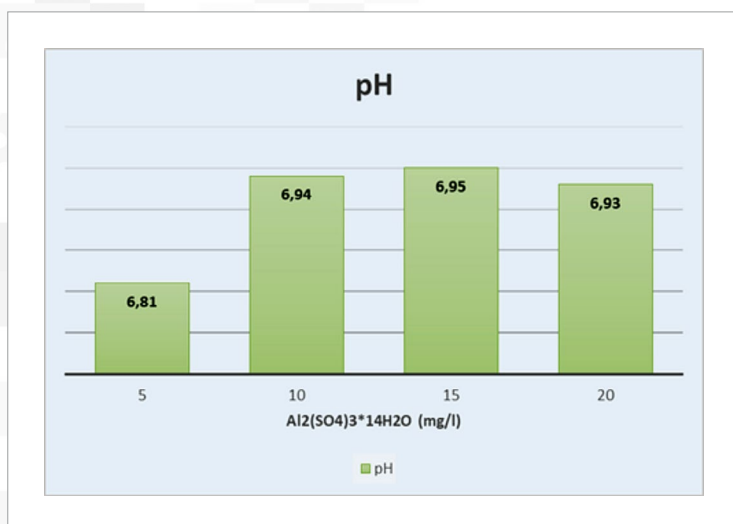
Fuente: autoría propia.

*Nota. La prueba de jarras se realiza en el laboratorio de la Universidad Libre aplicando diferentes cantidades de coagulante a cuatro vasos de precipitado de 500 ml que contienen la muestra de agua tomada en campo.*



**Figura 62** Turbiedad obtenida de la prueba de jarras.

Fuente: autoría propia.



**Figura 63** pH Obtenido de la prueba de jarras.

Fuente: autoría propia.

De los resultados presentados previamente, se evidencia que la dosis de coagulante que arroja el menor valor de turbiedad es 5 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$  y el pH se encuentra en el rango comprendido entre 6,5 y 9 exigido por la norma, dicha dosis se obtiene partiendo de los 1000 mg/L de la solución madre y el volumen de jarra de 0,5 L equivalente a 10 g/m<sup>3</sup>.

Para calcular la masa de coagulante a dosificar en la planta de tratamiento con el QMD se obtiene:

$$M_{coag} = 128,43 \frac{m^3}{día} * 10 \frac{g}{m^3} = 1244,31 \frac{g}{día}$$

$$M_{coag} = 1,28 \frac{kg}{día}$$

Ecuación (63) *Masa coagulante*

En la tabla 62, se presentan las dimensiones y capacidades de la canaleta Parshall según el ancho de garganta  $W = 0,076$  m alusivo al caudal de diseño QMD equivalente a  $0,0015$  m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 62** Dimensiones típicas de una canaleta Parshall para un ancho de garganta  $w=0,076$  m

Exponente	N	1,547	m		
Coefficiente	K	0,176	m		
Longitud paredes sección convergente	A	0,466	m	46,6	cm
Longitud sección convergente	B	0,457	m	45,7	cm
Ancho de la salida	C	0,178	m	17,8	cm
Ancho entrada sección convergente	D	0,259	m	25,9	cm
Profundidad total	E	0,381	m	38,1	cm
Longitud de la garganta	F	0,152	m	15,2	cm
Longitud de la sección divergente	G'	0,305	m	30,5	cm
Longitud paredes sección divergente	K'	0,025	m	2,5	cm
Dif. de elevación entre salida y cresta	N	0,057	m	5,7	cm
Longitud del fondo de aproximación	M	0,305	m	30,5	cm
Ancho entre los extremos de las paredes curvas	P	0,768	m	76,8	cm
Radio de curvatura de las paredes curvas	R	0,406	m	40,6	cm

Fuente: Condiciones recomendadas según Chow V. T 3, p. 74.

La adición del coagulante debe hacerse en donde ocurre la turbulencia, es decir en donde suceda el resalto hidráulico. Al hallar la altura del agua en el resalto (con los parámetros sugeridos por Salazar, L. (2012), se obtiene:

$$H_a = \left( \frac{Q}{0,110} \right)^{\frac{1}{1,5}} = \left( \frac{0,0015 \text{ m}^3/\text{s}}{0,110} \right)^{\frac{1}{1,5}} = 0,05 \text{ m}$$

Ecuación (64) *Altura del agua en el resalto*

Para hallar la velocidad en ese punto, se halla el ancho en la sección de medida  $D'$ :

$$D' = \left( \frac{2}{3} \right) * (D - W) + W = \left( \frac{2}{3} \right) * (0,26 \text{ m} - 0,076 \text{ m}) + 0,076 \text{ m} = 0,20 \text{ m}$$

Ecuación (65) *Ancho de la sección media*

Por lo tanto, se obtiene una velocidad, ( $V_a$ ) de:

$$V_a = \frac{Q}{D' * H_a} = \frac{0,0015 \text{ m}^3/\text{s}}{0,20 \text{ m} * 0,05 \text{ m}} = 0,16 \text{ m/s}$$

Ecuación (66) *Velocidad*

Con lo cual la energía total disponible en ese punto es de:

$$E_1 = H_a + N + \frac{V_a^2}{2g} = 0,05 \text{ m} + 0,06 \text{ m} + \frac{0,16 \text{ m/s}^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,10 \text{ m}$$

Ecuación (67) *Energía disponible en el punto*

Con el fin de determinar las dimensiones en el resalto, el cual es el punto de mayor importancia en este caso, ya que es en donde se va a aplicar el coagulante, se iguala la ecuación de Bernoulli  $E_2$  y  $E_1$ , con lo que se obtiene:

$$E_2 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

$$v_2 = \frac{Q}{W * H_2}$$

$$E_1 = \left( \frac{Q}{W * H_2} \right) * \left( \frac{1}{2g} \right) + H_2$$

Ecuación (68) *Igualación ecuación de Bernoulli*

Dando como resultado  $H_2 = 0,02 \text{ m}$ .

Con el fin de verificar si el diseño es adecuado, se halla la velocidad antes del resalto, ( $V_2$ ), el número de Froude, ( $N_f$ ), la altura en el resalto, ( $H_3$ ), con su respectiva velocidad de flujo, ( $V_3$ ), la profundidad de la lámina de agua al final de la canaleta, ( $H_4$ ) con su velocidad, ( $V_4$ ).



La unidad de mezcla rápida debe ser dimensionada en función del tiempo de mezcla y gradiente de velocidad, por lo tanto, con lo anterior se calcula el tiempo de mezcla, ( $t_d$ ), la pérdida de carga, ( $\Delta h$ ), y por consiguiente el gradiente de velocidad, ( $G$ ), quién es el que afirma si el diseño es efectivo para el objetivo esperado, se obtiene:

$$V_2 = \frac{Q}{W * H_2} = \frac{0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,076 \text{ m} * 0,02 \text{ m}} = 1,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Nf = \sqrt{\frac{V_2^2}{H_2 * g}} = \sqrt{\frac{(1,28 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{0,02 \text{ m} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 3$$

$$H_3 = \frac{H_2}{2} * (\sqrt{1 + 8 * Nf^2} - 1)$$

$$H_3 = \frac{0,02 \text{ m}}{2} * (\sqrt{1 + 8 * 3^2} - 1) = 0,06 \text{ m}$$

$$H_4 = H_3 - (N - K) = 0,06 \text{ m} - (0,06 \text{ m} - 0,025 \text{ m})$$

$$H_4 = 0,03 \text{ m}$$

$$V_3 = \frac{Q}{W * H_3} = \frac{0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,076 \text{ m} * 0,06 \text{ m}} = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_4 = \frac{Q}{C * H_4} = \frac{0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,178 \text{ m} * 0,03 \text{ m}} = 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_m = \frac{V_3 + V_4}{2} = \frac{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} = 0,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$t_d = \frac{2 * W}{V_3 + V_4} = \frac{2 * 0,076 \text{ m}}{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,27 \text{ s}$$

$$\Delta h = \frac{V_a^2}{2g} + H_a + N - \frac{V_4^2}{2g} - H_4 - (N - K)$$

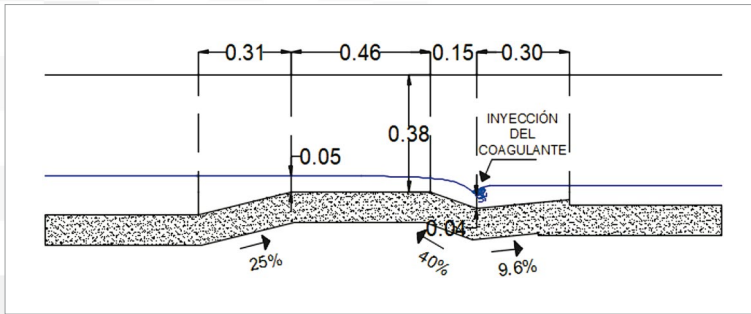
$$\Delta h = \frac{(0,16 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0,05 \text{ m} + 0,06 \text{ m} - \frac{(0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - 0,03 \text{ m} - (0,06 \text{ m} - 0,025 \text{ m}) = 0,04$$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * \Delta h}{\mu * t_d}} = \sqrt{\frac{9798 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0,04}{0,00114 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0,27 \text{ s}}}$$

$$G = 1078 \text{ s}^{-1}$$

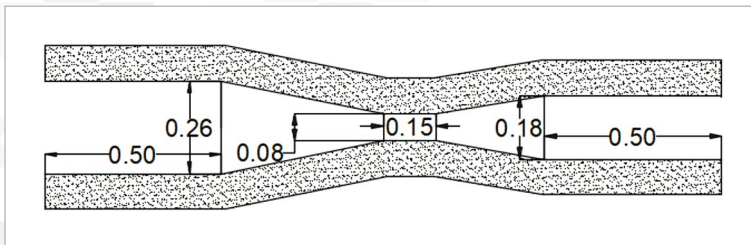
Ecuación (69) *Unidad de mezcla rápida*

El valor del gradiente de velocidad se encuentra dentro del rango recomendado por la norma, entre  $1000$  y  $2000\text{ s}^{-1}$ , por lo tanto, el diseño es apropiado para realizar la mezcla rápida y también funciona como aforador. A continuación, en las figuras 64 y 65 se presenta el esquema del diseño de este coagulador con su vista longitudinal y su vista en planta.



**Figura 64** Vista longitudinal de la Canaleta Parshall.

Fuente: autoría propia.



**Figura 65** Vista en planta de la Canaleta Parshall.

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.6 Floaculación

El acueducto Tunjaque actualmente no cuenta con un sistema de floaculación, por lo tanto, se diseña un floaculador hidráulico de flujo horizontal, el cual, según Romero Rojas, J. A. (1999), es usado principalmente en plantas pequeñas de caudales menores a  $50\text{ l/s}$ . Este elemento consiste en un tanque de concreto dividido por baffles, ubicados de tal forma que el agua haga un recorrido alrededor de los extremos libres de dichos baffles, con el fin de aglomerar las partículas coaguladas mediante una mezcla lenta que aumente las colisiones en estas sin romper el floculo formado. La ventaja de este diseño para el acueducto Tunjaque es el que no requiere de equipo mecánico y por lo tanto exige un mínimo mantenimiento. Para lograr una efectiva floaculación, se hallan las pérdidas por fricción mediante el método de Manning y el restante de pérdidas a través de la ecuación expuesta por el mismo autor, con el fin

de verificar si el gradiente de velocidad se encuentra dentro del rango sugerido por la resolución 0330 de 2017.

Para el diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal, se tiene en cuenta el *QMD* y se asigna un tiempo de retención hidráulica,  $t = 20$  min. con una velocidad de flujo transversal,  $U = 0,15$  m/s, un ancho del tanque,  $B = 3$ , una distancia entre baffles  $\varepsilon = 0,1$  m debido a que es un diseño tan pequeño. También se asigna un espacio libre entre los baffles y la pared,  $l' = 0,6$  m, con el fin de que el flujo pase adecuadamente por cada canal y el flóculo no se rompa. En este sentido, se halla la distancia total recorrida por el fluido, ( $L$ ), el volumen de agua que se mezcla en 20 minutos, ( $V$ ), el área transversal, ( $A_t$ ) y la profundidad del agua, ( $d$ ).

$$L = U * t * 60 = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 20 \text{ min} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 180 \text{ m}$$

$$V = Q * t * 60 = 0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 20 \text{ min} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 1,78 \text{ m}^3$$

$$A_t = \frac{V}{L} = \frac{1,78 \text{ m}^3}{180 \text{ m}} = 0,010 \text{ m}^2$$

$$d = \frac{A_t}{\varepsilon} = \frac{0,010 \text{ m}^2}{0,1 \text{ m}} = 0,1 \text{ m}$$

Ecuación (70) *Diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal*

La profundidad total en el tanque, ( $H$ ), adicionándole un borde libre de 0,3 m será:

$$H = d + 0,3 = 0,1 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 0,4 \text{ m}$$

Ecuación (71) *Profundidad del tanque*

Teniendo en cuenta el valor del ancho asignado, se determina la longitud efectiva de cada canal ( $l$ ):

$$l = B - l' = 3 \text{ m} - 0,6 \text{ m} = 2,4 \text{ m}$$

Ecuación (72) *Longitud efectiva de cada canal*

Es así como se obtiene el número de canales requerido, ( $N$ );

$$N = \frac{L}{l} = \frac{180 \text{ m}}{2,4 \text{ m}} = 75 \text{ canales}$$

Ecuación (73) *Número de canales requerido*

Se asigna un espesor de cada baffle de  $e = 0,03$  m para obtener una longitud de la cámara de floculación, ( $L'$ ) de:

$$L' = (N * \varepsilon) + (N-1) * e = (75 * 0,1 \text{ m}) + (75-1) * 0,03 \text{ m} = 9,72 \text{ m}$$

Ecuación (74) Longitud cámara de floculación

Al aplicar la ecuación de Manning con un coeficiente de fricción de 0,013, para hallar el valor de las pérdidas se tiene:

$$hf = \frac{(nU)^2 * L}{\left(\frac{d * \varepsilon}{(2 * d) + \varepsilon}\right)^{4/3}} = \frac{(0,013 * 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 * 180 \text{ m}}{\left(\frac{0,1 \text{ m} * 0,1 \text{ m}}{(2 * 0,1 \text{ m}) + 0,1 \text{ m}}\right)^{4/3}} = 0,06 \text{ m}$$

Ecuación (75) Valor de las pérdidas

Para el restante de pérdidas, (hp), como las causadas por el cambio de dirección se tiene:

$$hp = \frac{3 * (N - 1) * U^2}{2 * g} = \frac{3 * (75 - 1) * \left(0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,25 \text{ m}$$

Ecuación (76) Restante de pérdidas

Por último, con el fin de comprobar si el diseño permite una floculación efectiva se halla el gradiente de velocidad, (G) teniendo en cuenta las pérdidas totales  $h = 0,31 \text{ m}$ .

$$G = \sqrt{\frac{g * h * \rho}{t * 60 * \mu}} = \sqrt{\frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,31 \text{ m} * 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{20 \text{ min} * 60 * 0,00114 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}}$$

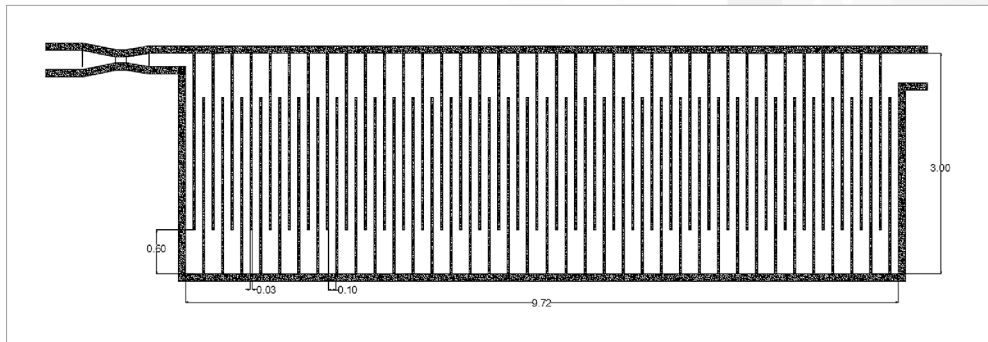
$$G = 48 \text{ s}^{-1}$$

Ecuación (77) Gradiente de velocidad

Donde,

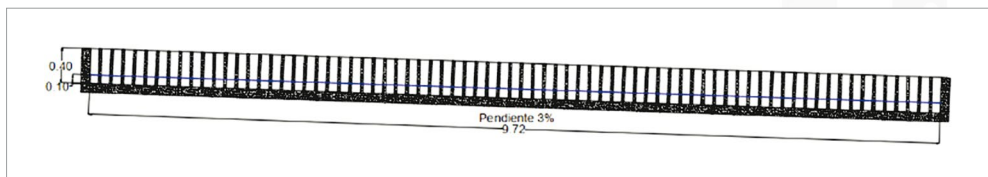
$g$  = Gravedad;  $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua;  $h$  = Pérdidas totales;  $t$  = Tiempo de retención hidráulica.

Según Romero Rojas, J. A. (1999) un gradiente de velocidad alto puede romper el floculo e impedir que adquiera un tamaño adecuado para su sedimentación rápida, un gradiente muy bajo no produce suficiente agitación, no permite una compactación suficiente ni una floculación completa; por lo tanto, el valor adecuado que propone la norma debe estar comprendido entre 10 y 70  $\text{s}^{-1}$ , es así como el gradiente cumple con las condiciones de diseño. A continuación, se muestra el diseño del floculador con su vista en planta y longitudinal.



**Figura 66** Vista en planta del floculador de flujo horizontal.

Fuente: autoría propia.



**Figura 67** Vista longitudinal del floculador hidráulico de flujo horizontal.

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.7 Sedimentación

Los tres factores principales que influyen en la sedimentación de partículas son su tamaño, forma y densidad, para el caso de las partículas floculentas, estos tres factores varían a medida que ellas se adhieren unas con otras mediante la floculación, diferente ocurre con las partículas discretas, quienes no cambian sus características físicas durante la sedimentación (Salazar, L., 2012). Para realizar un proceso de sedimentación de partículas floculentas en el acueducto Tunjaque, se decide diseñar un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas debido a que, según Romero Rojas, J. A. (1999), este es apropiado para dicho tipo de partículas, requiere menor profundidad, por lo tanto, menor uso de terreno que un sedimentador convencional y menores tiempos de retención, adicionalmente se puede desarrollar un flujo laminar. La eficiencia de este sedimentador es función de su longitud relativa y el ángulo de inclinación de sus placas; por lo tanto, se emplean los parámetros recomendados por el mismo autor para el diseño de este tipo de estructura. Adicionalmente, unas de las principales características que verifican el funcionamiento de un tanque de sedimentación son su tiempo de retención y carga superficial, cuyo parámetro es el más usado para el diseño y la clasificación de los sedimentadores, así que se tienen en cuenta los rangos de dichos valores, recomendados por la norma.

La eficiencia en la remoción de partículas floculentas dependerá de la profundidad del tanque, ( $H$ ), a la cual se le asigna un valor de 2,5 m debido a lo pequeño que es el caudal a tratar, también del ángulo de inclinación de las placas, ( $\theta$ ) cuyo valor asignado es de  $60^\circ$  y de la longitud relativa, ( $L$ ), que es calculada asignando un valor de longitud de placas, ( $l$ ) de 1,2 m y un espacio entre ellas, ( $e$ ) de 0,06 m dando como resultado:

$$L = \frac{l}{e} = \frac{1,2 \text{ m}}{0,06 \text{ m}} = 20$$

Ecuación (78) Eficiencia en la remoción de partículas

Con el fin de determinar la carga superficial del sedimentador, se asigna la longitud, ( $L_s$ ), de 1 m y un ancho de 0,7 m, con lo cual el área superficial es de:

$$A_s = L_s * B = 1 \text{ m} * 0,7 \text{ m} = 0,7 \text{ m}^2$$

Ecuación (79) Carga superficial del sedimentador

La carga hidráulica será de:

$$C_s = \frac{QMD}{A_s} = \frac{0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 86400}{0,7 \text{ m}^2} = 183,47 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Ecuación (80) Carga hidráulica

Se halla la velocidad promedio de flujo en el sedimentador de la siguiente manera:

$$V_o = \frac{QMD}{A_s * \sin \theta} = \frac{0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 86400}{0,7 \text{ m}^2 * 0,87} = 211,85 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Ecuación (81) Velocidad promedio del flujo del sedimentador

Con el fin de convertir el flujo uniforme del agua que entra al sedimentador en uno completamente laminar, se calcula la longitud relativa corregida, ( $L_c$ ) teniendo en cuenta la región de transición de la siguiente forma:

$$L' = \frac{0,013 * V_o * d}{v} = \frac{0,013 * 0,15 \text{ m/min} * 0,06 \text{ m}}{\frac{1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{\text{s}} * 60} = 1,67$$

$$L_c = L - L' = 20 - 1,67 = 18,32$$

Ecuación (82) Longitud relativa corregida

La eficiencia de un sedimentador de alta tasa radica por su parámetro, ( $S$ ), cuyo valor crítico, ( $S_c$ ), para sedimentadores de placas es de. Con el fin de tener un factor de

seguridad en el diseño se calcula la velocidad crítica de asentamiento, ( $V_{sc}$ ), a la cual, según Romero Rojas, J. A. (1999), se le recomienda un valor comprendido entre 14 y 22 m/día para partículas coaguladas con  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ .

$$V_{sc} = \frac{S_c * V_o}{\sin \theta + L_c \cos \theta} = \frac{1 * 211,85 \frac{m}{día}}{0,87 + (18,32 * 0,5)} = \frac{21m}{día}$$

Ecuación (83) *Velocidad crítica de asentamiento*

Para el presente diseño se asigna una altura de la zona de lodos de 0,2 m con una inclinación de 51° longitudinal y transversal con el fin de permitir una adecuada remoción de lodos. Se ubican dos vertederos de salida del agua sedimentada de 0,07 m de base y altura, determinados para la carga del sedimentador. El número de placas se determina asignando un espesor de ellas, ( $e$ ), de 0,01 m dando como resultado:

$$N = \frac{Ls * \sin \theta + d}{d + e} = \frac{(1 m * 0,87) + 0,06 m}{0,06 m + 0,01 m} = 13$$

Ecuación (84) *Número de placas requeridas*

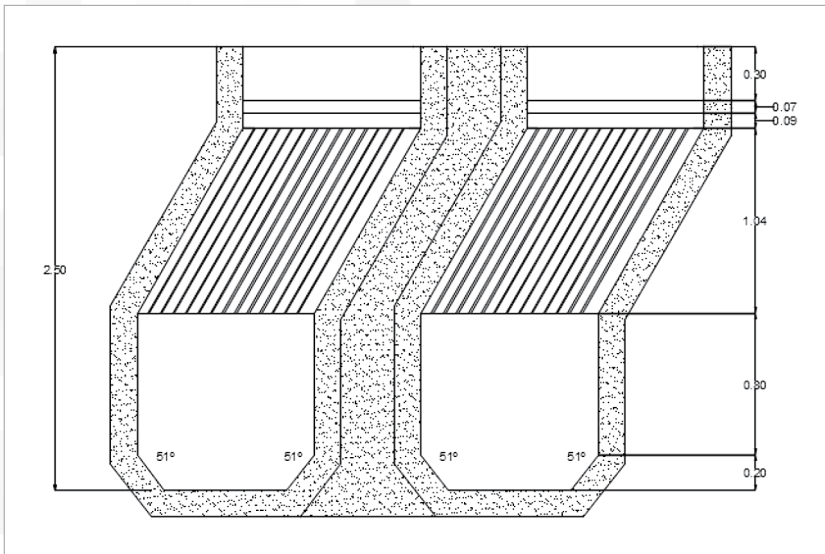
Por último, se halla el valor del número de Reynolds, ( $NRE$ ) y el tiempo de retención hidráulica, ( $t$ ), en el sedimentador:

$$NRE = \frac{V_o * d}{\nu} = \frac{211,85 \frac{m}{día} * 0,06 m}{\frac{1,14 \times 10^{-6} m^2}{s} * 86400} = 129$$

$$t = \frac{H * Ls * B}{QMD} = \frac{2,5 m * 1 m * 0,7 m}{0,0015 \frac{m^3}{s} * 60} = 20 \text{ min}$$

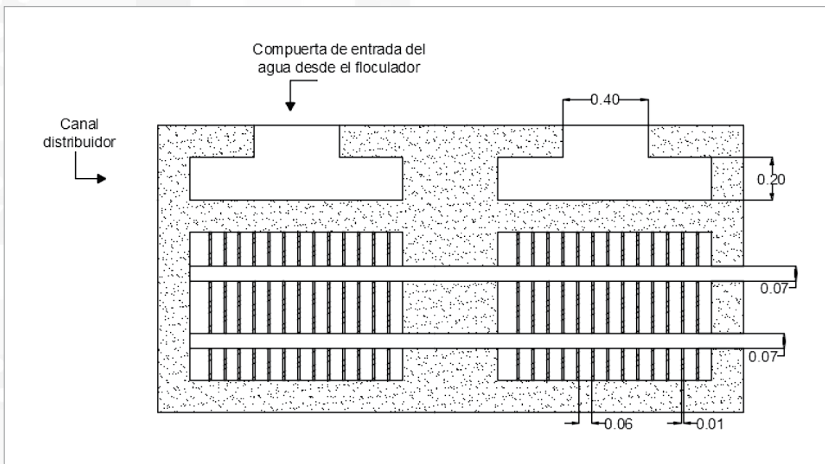
Ecuación (85) *Número de Reynolds*

El valor del número de Reynolds debe ser menor a 500 y el tiempo de retención debe estar entre 10 y 20 minutos según la resolución 0330 de 2017, por lo tanto, el diseño permite un flujo laminar y una sedimentación efectiva. A continuación, se presenta el esquema del sedimentador de alta tasa diseñado, en su vista longitudinal, en planta, transversal y el detalle de la zona de lodos.



**Figura 68** Vista longitudinal del sedimentador de alta tasa.

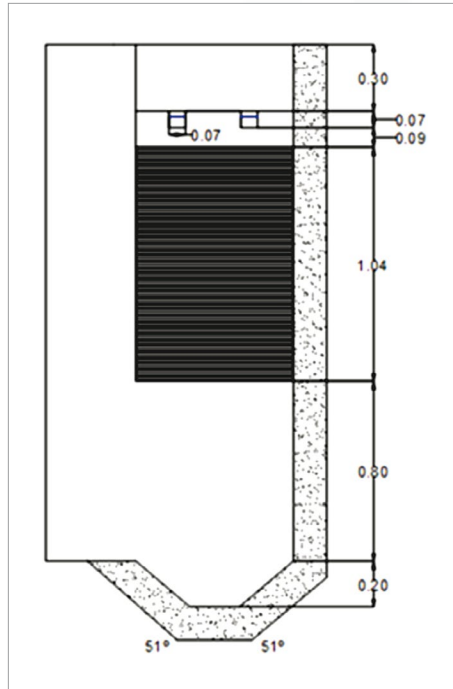
Fuente: autoría propia.



**Figura 69** Vista en planta del sedimentador de alta tasa.

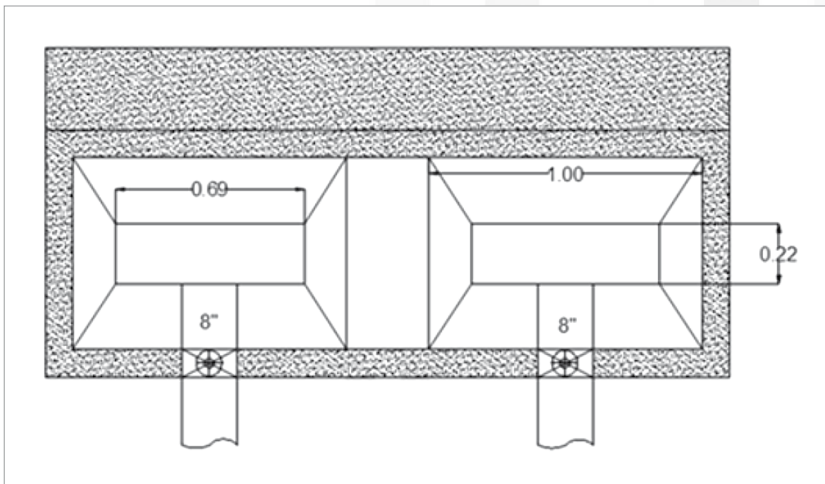
Fuente: autoría propia.





**Figura 70** Vista transversal del sedimentador de alta tasa.

Fuente: autoría propia.



**Figura 71** Zona de lodos del sedimentador de alta tasa.

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.8 Filtración

El principal propósito de la filtración es remover turbiedad con el fin de impedir la interferencia de esta con la desinfección al proveer protección a los microorganismos de la acción del desinfectante. Muchos de los microorganismos son resistentes a la desinfección, por lo tanto, la filtración es un proceso que ayuda a remover gran parte de ellos mediante la adsorción, ya que, las partículas suspendidas se unen y son adsorbidas sobre la superficie de los granos del medio o sobre el material previamente depositado. (Romero Rojas, J. A., 1999, pp. 193-194).

Para el acueducto veredal Tunjaque, se diseña un filtro rápido por gravedad, de lecho mixto constituido por antracita, arena y grava, con un falso fondo de tipo Leopold comercial y tasa declinante, cuya pérdida de carga se indique por el nivel de agua, debido a que este tipo de filtro usa una tasa de filtración mayor que los filtros convencionales y ocupan menos área en terreno (Romero Rojas, J. A., 1999). El lavado se deberá realizar de forma ascendente a contracorriente por medio de un tanque de lavado elevado. Según Higuera, O. F., Arroyave, J. F. y Flores, L. C. (2009), Las variables más importantes que influyen en la filtración son las características del medio filtrante, la porosidad y profundidad del lecho filtrante, la tasa de filtración, la pérdida de carga disponible y las características del afluente. Los criterios de diseño que se tienen en cuenta son los expuestos por la resolución 0330 de 2017. Se aplica la ecuación de Rose para determinar las pérdidas por fricción a través de los lechos del material granular, la cual tiene aplicación en el cálculo de la pérdida de energía a través de un filtro limpio y para determinar las características del medio filtrante. Se tienen en cuenta las recomendaciones expuestas por el autor Romero Rojas, J. A. (1999) y dicha norma, para el lavado de los filtros se aplican las ecuaciones de Salazar, L. (2012).

$$h = 1,067C_D \frac{1}{e^4} * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{g}$$

Ecuación (86) *Ecuación de Rose*

$CD$  = Coeficiente de arrastre

$e$  = Porosidad del lecho (volumen de vacíos/volumen del lecho)

$d$  = Diámetro característico de los granos

$v$  = Velocidad de filtración m/s

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido en m<sup>2</sup>/s

Por último, con el fin de verificar el lavado del lecho filtrante, se tiene en cuenta el tamaño, el cual viene determinado por su tamaño efectivo que es el tamiz que deja pasar un 10% del material en peso y la uniformidad del tamaño, que es determinada por el coeficiente de uniformidad, representado como la relación entre el tamaño

del tamiz que deja pasar el 60% del material en peso y el tamaño efectivo (Romero Rojas, J. A., 1999).

Para el dimensionamiento de las unidades de filtrado se tiene en cuenta una tasa de filtración, ( $q$ ) de 235 m/día siguiendo los criterios de la norma para el tipo de filtro seleccionado, que en este caso se trata de un filtro rápido por gravedad, de lecho mixto y tasa declinante. Para calcular la cantidad de filtros necesarios, ( $N$ ), se tiene:

$$N = 0,044\sqrt{QMD} = 0,044\sqrt{128,3 \text{ m}^3/\text{día}} = 0,5 \approx 1$$

Ecuación (87) *Número de filtros requeridos*

Según la ecuación anterior, debido al caudal tan pequeño que posee la planta es necesario solo un filtro, sin embargo, siguiendo las recomendaciones de la Resolución 0330 de 2017 se diseña un segundo filtro para las situaciones en que se deba realizar mantenimiento en uno y no se interrumpa la operación en la planta de tratamiento. Se procede a hallar las dimensiones de los filtros de la siguiente forma:

$$Q_f = \frac{QMD}{N} = \frac{128,43 \text{ m}^3/\text{día}}{1} = 128,43 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$A_s = \frac{q}{Q_f} = \frac{235 \text{ m/día}}{128,43 \text{ m}^3/\text{día}} = 0,54 \text{ m}^2$$

Ecuación (88) *Dimensiones de los filtros (a)*

Se asigna una relación de largo y ancho  $L/B$  de 3; por lo tanto, se obtienen las dimensiones:

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{3}} = \sqrt{\frac{0,54\text{m}^2}{3}} = 0,43 \text{ m}$$

$$L = B * 3 = 1,28 \text{ m}$$

Ecuación (89) *Dimensiones de los filtros (b)*

Para hallar las pérdidas por fricción de los lechos filtrantes, se asigna una profundidad de antracita de 0,6 m, arena 0,15 m y de grava 0,3 m que prevenga el paso de la arena al fondo del tanque. Debido a que se trata de un filtro rápido mixto, la arena se encuentra estratificada con una porosidad,  $e = 0,45$ , cuya granulometría se presenta a en las tablas 5.14 y 5.15 de acuerdo a las recomendaciones de Romero Rojas, J. A. (1999).

**Tabla 63** Características físicas de la arena.

Nomenclatura	Variable	Valor
Factor de esfericidad	$\Psi$	1
Factor de forma de volumen	B	0,52
Factor de forma de área superficial	A	3
Relación $\alpha/\beta$	$\alpha/\beta$	6

Fuente: autoría propia.

**Tabla 64** Análisis diferencial de partículas de arena.

Número de tamiz	Tamaño promedio (di) (cm)	Arena retenida %Pi	CDi	Pi/di	CDiPi/di
28-32	0,054	14,67	56,9	271,7	15459,7
32-35	0,046	17,9	65,1	389,1	25330,4
35-42	0,038	17,5	78,3	460,5	36057,2

Fuente: autoría propia.

Aplicando la ecuación de Rose para determinar las pérdidas se obtiene:

$$h_{\text{arena}} = 0,178 * \frac{v^2}{2e^4} * \frac{\alpha}{\beta} * \sum C_{Di} \frac{P_i}{D_i} * L$$

$$h_{\text{arena}} = 0,178 * \left( \frac{235 \frac{\text{m}}{\text{día}}}{86400} \right)^2 * \frac{1}{9,81 \text{m/s}^2} * \frac{1}{(0,45)^4} * \frac{3}{0,52} * 76847,3 * 015 \text{ m} = 0,21 \text{ m}$$

Ecuación (90) Cálculo de pérdidas

En donde,

$v$  = Velocidad de filtración

$C_{Di}$  = Coeficiente de arrastre para los granos de promedio  $P_i$

$P_i$  = Fracción en peso de partículas de tamaño  $d_i$

Para el caso de la antracita, esta se toma de tamaño uniforme,  $d = 1 \text{ mm}$  con una porosidad,  $e = 0,50$ , la viscosidad cinemática del agua a  $15^\circ\text{C}$  es de,  $\nu = 1,14 \text{ m}^2/\text{s}$  y se emplea la ecuación de Rose de la siguiente forma:

$$N_{RE} = \frac{vd}{\nu} = \frac{0,16 \frac{\text{m}}{\text{min}} * 0,001 \text{ m}}{1,14 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 2,33$$

$$CD = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{\sqrt{N_{RE}}} + 0,34 = \frac{24}{2,33} + \frac{3}{\sqrt{2,33}} + 0,34 = 12$$

Ecuación (91) Cantidad de antracita requerida

Por lo tanto, la pérdida en el lecho de antracita será:

$$h = 1,067 C_D \frac{1}{e^4} * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{g}$$

$$h = 1,067 * 12 * \frac{1}{0,50^4} * \frac{0,6 \text{ m}}{0,001 \text{ m}} * \frac{\left(\frac{2,71 \times 10^{-3} \text{ m}}{\text{s}}\right)^2}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,1 \text{ m}$$

Ecuación (92) Pérdida de antacita en el lecho

De la misma forma se calcula la pérdida por fricción en la grava, teniendo en cuenta una porosidad de 0,25 y un diámetro de 25 mm, para un total de 0,0023 m de pérdidas. Es así como la pérdida total en el medio filtrante es de 0,3 m.

### 5.5.3.9 Lavado

Para el lavado de los filtros se ubica un tanque elevado a 7 m, se asigna una velocidad de lavado ascensional,  $v_l = 0,013 \text{ m/s}$  y se procede a hallar el caudal de lavado de la siguiente forma:

$$Q_l = B * L * v_l = 0,43 \text{ m} * 1,28 \text{ m} * 0,013 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,0071 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ecuación (93) Caudal de lavado

Debido a que se trata de un solo filtro y de dimensiones reducidas, solo se instala una canaleta de lavado con un ancho,  $B_c = 0,15 \text{ m}$ , por lo tanto, al calcular la altura máxima del agua sobre esta se obtiene:

$$H_o = \left(\frac{Q_l}{B_c * 1,375}\right)^{2/3} = \left(\frac{0,0071 \text{ m}^3/\text{s}}{0,15 \text{ m} * 1,375}\right)^{2/3} = 0,11 \text{ m}$$

Ecuación (94) Altura máxima del agua en la canaleta

Se asigna un tiempo de lavado,  $t = 1^{\circ} \text{ min}$  y se obtiene un volumen de lavado de:

$$V_L = Q_l * t = 0,0071 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 10 \text{ min} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 4,26 \text{ m}^3$$

Ecuación (95) Volumen de lavado

El volumen de agua filtrada, ( $V_f$ ), en 20 horas será:

$$V_f = Q_f * T_f = 128 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 20 \text{ horas} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 107 \text{ m}^3$$

Ecuación (96) *Volumen de agua filtrada*

Por lo tanto, el porcentaje de agua para lavado es de:

$$\% \text{ Agua lavado} = \frac{V_L}{V_f} * 100 = \frac{4,26 \text{ m}^3}{107 \text{ m}^3} * 100 = 4\%$$

Ecuación (97) *Porcentaje de agua para lavado*

Romero Rojas, J. A. (1999) recomienda que este porcentaje se encuentre en el intervalo de 2% a 6%, por lo tanto, el diseño cumple. Para una tasa de lavado  $ql = 0,8 \text{ m}^3/\text{min}$  el volumen del tanque de lavado es de:

$$V_{\text{tanque}} = A_s * t * ql = 0,54 \text{ m}^2 * 10 \text{ min} * 0,8 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 4 \text{ m}^3$$

Ecuación (98) *Volumen del tanque de lavado*

Con el fin de verificar si el lavado se hace correctamente, se halla la fluidización adecuada y la expansión del lecho filtrante, la cual, se recomienda de un valor inferior a 40% para la arena y de 25% para antracita. Para hallar esta, en el lecho de antracita se tiene en cuenta la granulometría de la tabla 65, se elige un tamiz de malla 18 con abertura,  $D_{10} = 1 \text{ mm}$  como el tamaño efectivo, ya que este deja pasar el 10% del material en peso de las partículas y para hallar el coeficiente de uniformidad se escoge el tamiz de malla 14 con abertura,  $D_{60\text{antracita}} = 1,4 \text{ mm}$ , debido a que este deja pasar el 60%, obteniendo mediante esta relación, un coeficiente de uniformidad,  $CU = 1,4$ . Para la arena, se elige un tamiz de malla 40, cuyo tamaño efectivo es  $D_{10} = 0,45 \text{ mm}$  y un tamiz de malla 30 con abertura,  $D_{60\text{arena}} = 0,59 \text{ mm}$  con el fin de obtener un coeficiente de uniformidad,  $CU = 1,3$ .

**Tabla 65** *Granulometría típica para un lecho dual.*

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa	
		Carbón	Arena
4	4,760	99-100	
6	3,360	95-100	
14	1,410	60-100	
16	1,168	30-100	
18	1,000	0-50	
20	0,833	0-5	96-100
30	0,589		70-90
40	0,417		0-10
50	0,295		0-5

Fuente: Romero, 1999, p. 226

Se procede a hallar la velocidad de arrastre de los lechos de la siguiente forma:

$$V_{t \text{ antracita}} = (10 * CU_{\text{antracita}} * D_{60 \text{ antracita}}) = 10 * 1,4 * 1,4 \text{ mm} = 19,6 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{t \text{ arena}} = (4,7 * CU_{\text{arena}} * D_{60 \text{ arena}}) = (4,7 * 1,3 * 0,59 \text{ mm}) = 3,6 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Ecuación (99) *Velocidad de arrastre de los lechos*

La velocidad apropiada de lavado para la antracita,  $V_{b(\text{antracita})}$ , y para la arena,  $V_{b(\text{arena})}$  a 20°C es de:

$$V_{b(\text{antracita } 20^\circ\text{C})} = 0,47 * D_{60(\text{antracita})} = 0,47 * 1,4 \text{ mm} = 0,66 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{arena } 20^\circ\text{C})} = D_{60(\text{arena})} = 0,59 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Ecuación (100) *Velocidad apropiada de lavado*

Debido a que el fluido en el que se está trabajando posee una temperatura de 15°C, al hacer la respectiva corrección teniendo en cuenta la viscosidad,  $\mu$  en centipoises, se tienen las velocidades apropiadas de lavado para esa temperatura:

$$V_{b(\text{antracita } 15^\circ\text{C})} * (\mu)^{-1/3} = 0,66 \frac{\text{m}}{\text{min}} * (1,14 \text{ cp})^{-1/3} = 0,63 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{arena } 15^\circ\text{C})} * (\mu)^{-1/3} = 0,59 \frac{\text{m}}{\text{min}} * (1,14 \text{ cp})^{-1/3} = 0,56 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Ecuación (101) *Velocidades apropiadas de lavado según temperatura*

Las condiciones para que exista una adecuada fluidización en los lechos son:

$$V_{b(\text{antracita } 15^\circ\text{C})} * (e_{(\text{antracita})})^{4,5} = 0,63 \frac{\text{m}}{\text{min}} * (0,50)^{4,5} = 0,03 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{antracita})} > 0,03 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{arena } 15^\circ\text{C})} * (e_{(\text{arena})})^{4,5} = 0,56 \frac{\text{m}}{\text{min}} * (0,45)^{4,5} = 0,02 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{arena})} > 0,02 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Ecuación (102) *Condiciones para la adecuada fluidización en los lechos*

Realizando un promedio entre los valores de  $V_b$  y  $V_t$  de los lechos, si se aplica una velocidad de lavado de 11,6 m/min arrastraría el medio del lecho, y una velocidad de

0,025 m/min, lo fluidizaría, pero no lo expandiría. La limpieza de un medio granular durante el lavado es el resultado del esfuerzo cortante producido por el agua de lavado y, principalmente, de la abrasión resultante de los contactos entre las partículas del lecho fluidizado, dicha abrasión ocurre cuando la velocidad del lavado es igual al 10% de la velocidad de arrastre (Romero Rojas, J. A., 1999), por lo tanto, al aplicar la siguiente expresión se obtiene:

$$V_{b(\text{antracita})} = 0,1 * V_{t(\text{antracita})} = 0,1 * 19,6 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 1,96 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V_{b(\text{arena})} = 0,1 * V_{t(\text{arena})} = 0,1 * 3,6 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0,36 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Ecuación (103) *Velocidad de lavado para cada tipo de lecho*

Es así, como la velocidad apropiada de lavado para los dos lechos es de 1,16 m/min.

Con el fin de hallar la expansión en los lechos, se obtiene una relación  $\frac{V_b}{V_t} = 0,1$  para ambos lechos, de lo cual se derivan los siguientes valores de expansión, (RE):

$$RE_{(\text{antracita})} = \frac{(0,1)^{0,22} - e_{(\text{antracita})}}{1 - (0,1)^{0,22}} = \frac{0,6 - 0,50}{0,4} = 25\%$$

$$RE_{(\text{arena})} = \frac{(0,1)^{0,22} - e_{(\text{arena})}}{1 - (0,1)^{0,22}} = \frac{0,6 - 0,45}{0,4} = 38\%$$

Ecuación (104) *Valores de expansión de los lechos*

Según la recomendación anteriormente mencionada, la expansión del lecho filtrante es adecuada para el lavado, ya que es de 25% para antracita e inferior al 40% para arena. Por último, al hallar el diámetro de tubería de lavado apropiado para una velocidad de 1,16 m/min, se obtiene:

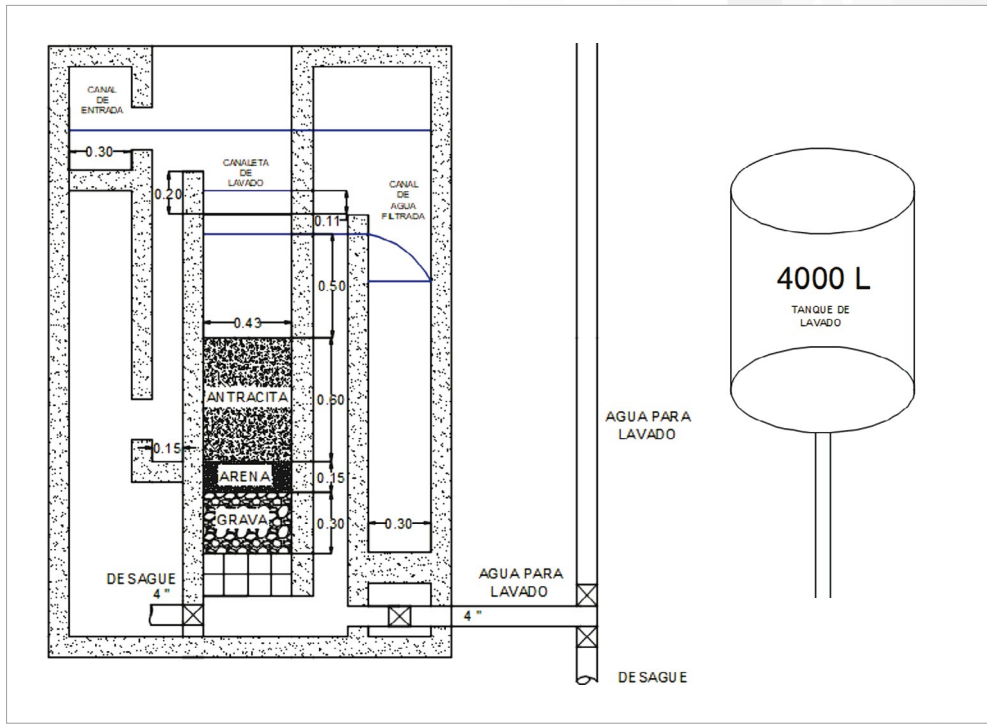
$$\text{Área de flujo} = V_{\text{tanque}} * t * V_b = 4 \text{ m}^3 * 10 \text{ min} * 1,16 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 0,006 \text{ m}^2$$

$$\phi_{\text{tubería}} = 0,09 \text{ m} = 4 \text{ pulgadas}$$

Ecuación (105) *Diámetro apropiado de tubería*

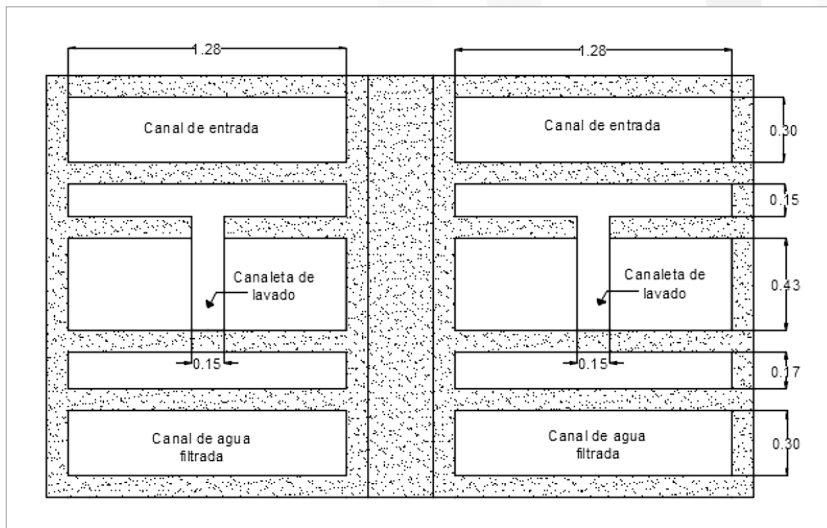
A continuación, en las figuras 72 y 73 se presenta el diseño de los filtros en su vista transversal, en planta y el detalle del tanque de lavado.





**Figura 72** Vista transversal del filtro rápido mixto y su tanque de lavado.

Fuente: autoría propia.



**Figura 73** Vista en planta del filtro rápido mixto.

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.10 Desinfección

La desinfección es indispensable para un acueducto, consiste en eliminar los microorganismos en el agua causantes de la producción de enfermedades, pero este es un proceso pasivo, lo que quiere decir, que no destruye todos los organismos presentes en el agua y no siempre elimina todos los organismos patógenos, por lo tanto, este se debe ubicar después de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, con el fin de evitar que las partículas causantes de la turbiedad se conviertan en obstáculos para la acción del agente desinfectante por medio de los aglomerados celulares formados por las mismas. El pH juega un papel importante, ya que, dependiendo de la naturaleza del desinfectante, con este se tiene mayor o menor efectividad; el tiempo de contacto también, debido a que, en cuanto mayor sea su valor, mayor será la posibilidad de destrucción de microorganismos para una cierta dosis de desinfectante aplicado. (Salazar, L., 2012).

Para el caso del acueducto Tunjaque, se decide emplear como agente desinfectante hipoclorito de sodio, debido a que, según Salazar, L. (2012), este es más sencillo de manejar que el cloro gaseoso para un acueducto tan pequeño, pero tiene la misma eficiencia bactericida. Se diseña un tanque de contacto con baffles que permita una agitación efectiva, con el fin de distribuir uniformemente los microorganismos en el agua evitando la obstaculización de la acción del desinfectante y se calcula entonces, las dimensiones de este tanque junto a la dosis de hipoclorito teniendo en cuenta el método concentración-cloro, recomendado por el mismo autor, que parte del principio de que la concentración, ( $C$ ), de cloro libre aplicado multiplicada por el tiempo de detención, ( $t$ ), desde que se aplica dicha dosis hasta que se consume en el agua, es igual a una constante, ( $K$ ); representando lo anterior se tiene,  $Ct = K$ . Los valores de  $K$  se tienen en cuenta según lo recomendado por la resolución 0330 de 2017.

Según la resolución 0330 de 2017, si la operación de la PTAP permite que durante el 90% de su proceso, la turbiedad del agua filtrada se mantenga durante el 95% del tiempo menor a 1 UNT, deben usarse los datos de la tabla 13 del parágrafo 2° en el artículo 121 de la misma norma, definida para una desinfección con cloro libre, con el fin de determinar  $K$  en función de la temperatura del agua y su pH. Teniendo en cuenta las mediciones de calidad de agua realizadas, en donde se obtiene una turbiedad de 0,53 UNT, se aplica dicho criterio:

Se utilizan los valores de  $Ct = K$  en  $mg\text{-min}/l$  para inactivación de quiste Giardia por Cloro libre, en donde:

$C$  = Concentración de cloro libre

$K$  = Constante empírica que depende del pH.

$t$  = Tiempo de detención desde que se aplica dicha dosis hasta que se consume el agua.

Con una dosis de cloro libre de 0,8 mg/L se determina el valor de  $K$ , aplicando los datos de  $pH= 6,5$  y  $T^{\circ}= 15^{\circ}C$ , dando como resultado un valor de  $K = 24 \text{ mg}^* \text{ min}/L$ .

Para determinar el tiempo de contacto se aplica:

$$t = \frac{24 \text{ mg} * \frac{\text{min}}{L}}{0,8 \frac{\text{mg}}{L}} = 30 \text{ min}$$

Ecuación (106) *Tiempo de contacto*

Para conocer la capacidad del clorador se obtiene:

$$C = QMD * Dosis = 0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 800 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 1,2 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

$$C = 103,68 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Ecuación (107) *Capacidad del clorador*

El volumen del tanque de contacto es de:

$$V = QMD * t = 0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 30 \text{ min} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}$$

$$V = 2,68 \text{ m}^3$$

Ecuación (108) *Volumen del tanque de contacto*

Con un área de profundidad,  $H = 2 \text{ m}$ , el área es:

$$A = \frac{V}{H} = \frac{2,68 \text{ m}^3}{2 \text{ m}} = 1,35 \text{ m}^2$$

Ecuación (109) *Área ocupada por el clorador*

Se adopta una estructura tipo rectangular, así que, debe satisfacer la siguiente condición de largo, ( $L$ ), y ancho, ( $B$ ):  $1 < L/B < 3$ . Por lo tanto, asumimos que  $L/B = 2$ .

$$B = \sqrt{\frac{A}{2}} = \sqrt{\frac{1,35 \text{ m}^2}{2}} = 0,82 \text{ m}$$

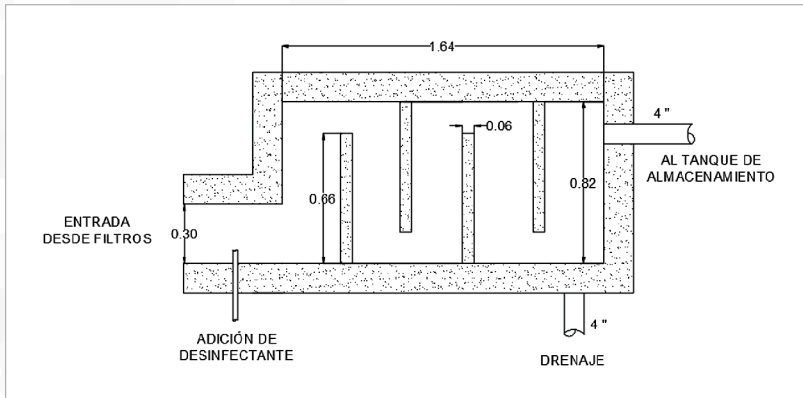
Ecuación (110) *Alto de la estructura*

Como resultado, (L), será igual a:

$$L = 2 * B = 2 * 0,82 \text{ m} = 1,64 \text{ m}$$

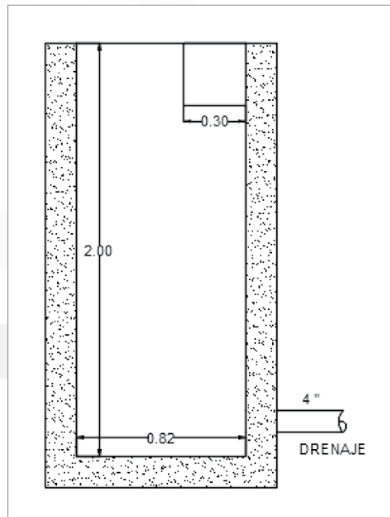
Ecuación (111) Largo de la estructura

Al tanque de contacto se le adicionan 4 baffles de 0,66 m de largo y espesor de 0,06 m cada uno, con el fin de que se haga una agitación efectiva del desinfectante y no se obstaculice la acción de este con los microorganismos. El esquema de este diseño se presenta a continuación en las figuras 74 y 75:



**Figura 74** Vista en planta del tanque de contacto.

Fuente: autoría propia.



**Figura 75** Vista transversal del tanque de contacto.

Fuente: autoría propia.

### 5.5.3.11 Tanque de Almacenamiento

“Los tanques de almacenamiento tienen como función hidráulica suministrar agua para consumo humano con las presiones de servicio adecuadas, y en la cantidad necesaria que compense las variaciones de la demanda; asimismo, debe contar con un volumen adicional para suministrar en casos de emergencia como incendios, suspensión temporal de la fuente de abastecimiento y/o paralización parcial de la planta de tratamiento” (Laín, S., Cruz, C. H., Valencia, Y., Torres, P., y Montoya, C., 2011).

Dado que el acueducto se encuentra entre un nivel de complejidad del sistema medio, para la determinación del volumen del tanque de almacenamiento, “si no existen datos que describan las curvas de variación del consumo horario, el volumen almacenado será igual que 1/3 del volumen distribuido a la zona que va a ser abastecida en el día de máximo consumo, garantizando en todo momento las presiones adecuadas” (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico et ál., 2010)

Como el suministro de agua para el acueducto veredal Tunjaque es continuo, se calcula el volumen requerido en el tanque de almacenamiento como 1/3 del caudal máximo diario consumido en el día, para este caso será:

$$V_{\text{suministrado}} = \frac{128.43 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{3} = 42.81 \text{m}^3$$

Ecuación (112) Volumen requerido del tanque de almacenamiento

El volumen del tanque de almacenamiento proyectado al año 2044 es de 42,81 el cual es suficiente para suministrar a la comunidad, teniendo en cuenta que el QMD es el caudal de diseño para el cual se debe calcular el volumen del tanque de almacenamiento. Por último, dentro de los requerimientos según la resolución 0330 de 2017 la limpieza del tanque se debe realizar cada 6 meses con todas las previsiones necesarias para no afectar el servicio.

## 5.6 CONSIDERACIONES FINALES

A partir de los parámetros hidrológicos en la quebrada Chinzaco es posible establecer que la capacidad de esta fuente superficial es suficiente para otorgar agua para el sistema de acueducto Tunjaque, esto se debe a que el caudal correspondiente al 95% determinado en la curva de duración de caudales es superior al caudal máximo diario (QMD) calculado para el periodo de diseño a 2044 cumpliendo así lo señalado en la resolución 0330 de 2017.

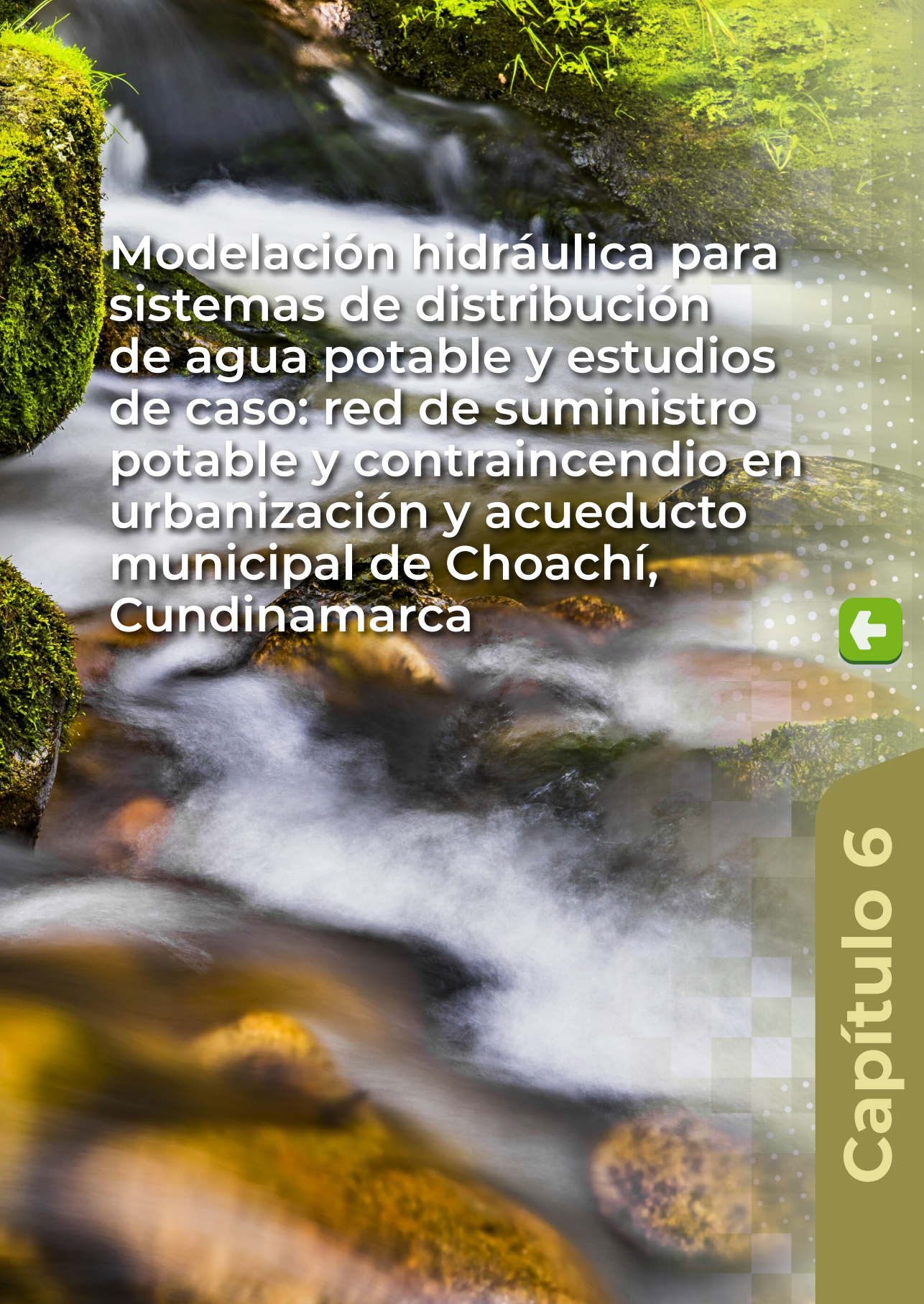
Los usuarios de un acueducto veredal como el de Tunjaque pueden estar satisfechos con el servicio de agua brindado debido a sus condiciones sociales y económicas, pero este no es un parámetro infalible que demuestre la calidad del agua real, por lo tanto, se debe realizar control de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua en todos los puntos que conforman el sistema de suministro y en toda época del año.

Las organizaciones prestadoras del servicio de acueducto en las zonas rurales, no siempre tienen en cuenta lo indispensable que es el proceso de desinfección en este sistema y se conforman con implementar tratamientos primarios que permitan brindar agua suficiente a los usuarios, por lo tanto, se recomienda siempre hacer los análisis respectivos de agua y tener en cuenta a la desinfección como un proceso fundamental.

Dentro de las condiciones para que un sistema de acueducto sea eficiente y continuo, es necesario reducir las pérdidas de todo el sistema tanto técnicas y comerciales, por esta razón se reitera la importancia de la instalación de macromedidores y micromedidores con el fin de conocer la cantidad de agua consumida dentro del acueducto y llevar un adecuado control de pérdidas en este sistema.

Las alternativas de diseño expuestas, cumplen con lo establecido por la normatividad vigente y las recomendaciones de varios autores que mediante la práctica han demostrado su efectividad, sin embargo, se recomienda que, al momento de ejecutar la instalación y operación de estos elementos, se verifique el cumplimiento de los parámetros que garantizan la eficiencia en los procesos mencionados en el presente capítulo.

Se recomienda que todas las estructuras de tratamiento de agua diseñadas para el acueducto Tunjaque, cuenten con un cerramiento o placas de cubierta, que impidan el acceso de personal no autorizado y/o animales, que provoquen afectaciones negativas en estos elementos y la calidad del agua brindada.



**Modelación hidráulica para  
sistemas de distribución  
de agua potable y estudios  
de caso: red de suministro  
potable y contraincendio en  
urbanización y acueducto  
municipal de Choachí,  
Cundinamarca**



**Capítulo 6**

La gestión adecuada de los recursos hídricos debe garantizar el abastecimiento de la población y las actividades antrópicas como base fundamental para el desarrollo social e industrial, en consecuencia, la disponibilidad del recurso en los territorios es un reto al que se enfrentan las grandes ciudades e inclusive zonas rurales. Una de las prácticas que ha tomado fuerza en la actualidad para la gestión del agua son las modelaciones hidrológicas e hidráulicas que permiten predecir y evaluar la dinámica del agua expuesta a diversos escenarios, permitiendo tomar decisiones más asertivas que garanticen la protección y conservación del recurso.

En el presente capítulo, se referencian las características del software de modelación hidráulica EPANET, desarrollado por Environmental Protection Agency -EPA (Agencia de Protección Ambiental) del gobierno de los Estados Unidos, este software realiza simulaciones del comportamiento hidráulico en redes de distribución a presión, incluyendo sus principales componentes a evaluar como: tuberías, nudos (conexiones), bombas, válvulas, tanques de almacenamiento, depósitos y diferentes tipos de controladores para la red como abrir y cerrar componentes durante un tiempo establecido; determinando el caudal que circula por cada una de las conducciones, la presión en cada uno de los nudos, el nivel de agua en cada tanque. Además, es posible determinar el tiempo de permanencia del agua en las tuberías, así como estudios de la procedencia del agua en cada punto de la red, permitiendo la mejora del sistema de distribución a través de la evaluación de características claves como las múltiples fuentes de abastecimiento, la variación de los esquemas de bombeo, llenado o vaciado de los depósitos y conducciones que deben ser limpiadas o sustituidas.



Adicionalmente, es importante resaltar las características específicas del modelo hidráulico del software, el cual se basa en las fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy - Manning para el cálculo de las pérdidas por fricción al interior de los conductos, de igual manera, el software estima pérdidas menores asociadas a los diferentes elementos de la red como codos o acoplamientos, finalmente EPANET es capaz de modelar y evaluar, diferentes tipos de válvulas, la energía consumida en las estaciones de bombeo, el almacenamiento de agua en tanques que presenten cualquier geometría, emisores de consumos dependientes (rociadores, aspersores), categorías de consumo en los nudos independientes con su propia curva de modulación y regulaciones temporales complejas. (U.S. Environmental Protection Agency, 2000).

### 6.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SOFTWARE

Una vez se cuenta con el concepto de la red hidráulica, es decir, los diseños para una red nueva o el levantamiento de información de una red existente, se procede a implantar esta información en el software EPANET, con la finalidad de simular un escenario lo más cercano posible a la realidad, basándose en las fórmulas matemáticas para el cálculo de las pérdidas por fricción al interior del conducto como: Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning.

En la tabla 66 Componentes Epanet se relacionan los principales parámetros que requiere el software para recrear el escenario de una red a presión.

**Tabla 66** Componentes Epanet.

Componente	Información requerida
Nodos	Demanda base (QMD)
	Cota
Tuberías	Longitud
	Rugosidad
	Diámetro
Válvulas	Tipo de válvula
	Presión a regular
Tanque	Cota
	Nivel inicial, mínimo y máximo
	Diámetro
Especiales	Curva de modulación
	Controladores

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2000)

Cabe resaltar que la información relacionada en la anterior tabla, se considera como esencial u obligatoria para que el modelo de la red pueda ejecutarse y obtener resultados, no obstante, cada uno de los componentes cuenta con otros datos de entrada que permiten que el modelo sea lo más realista posible; inclusive permite ingresar las coordenadas reales de cada componente, que no afectan los resultados del modelo directamente, pero mejora la presentación del modelo.

### 6.6.1 *Resultados a evaluar*

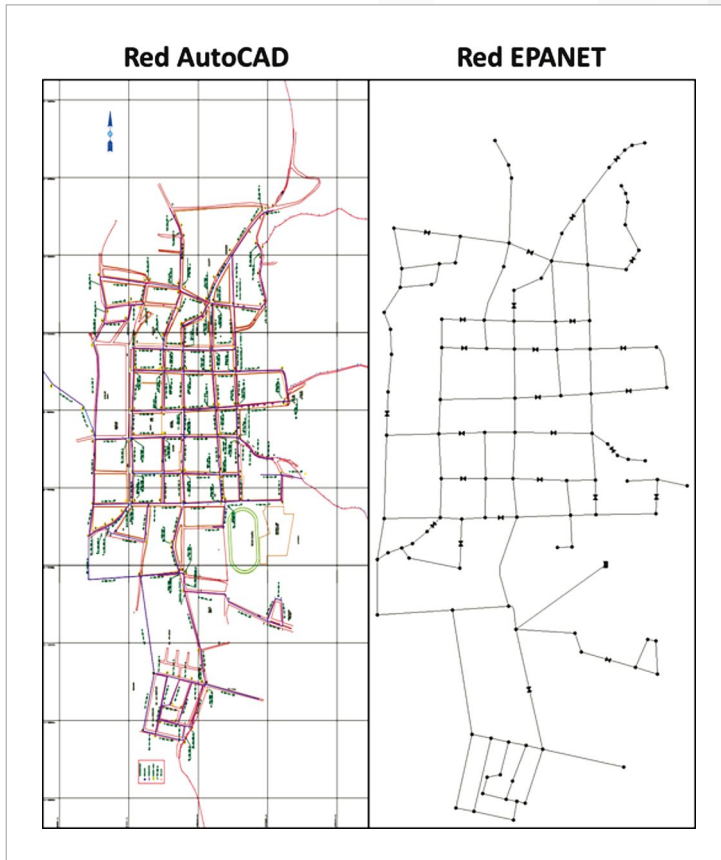
De acuerdo a los valores obtenidos por el programa, se evalúan los componentes que pueden colapsar en la red, generalmente estas deficiencias se relacionan a dos variables principalmente: las presiones y velocidades en el sistema, por lo cual, es fundamental establecer rangos que permitan el óptimo funcionamiento del sistema hidráulico, generalmente estos valores son establecidos por normas técnicas que procuran garantizar la durabilidad de las redes.

Se deben evitar las sobrepresiones o depresiones en el sistema, que puedan asociarse a la pérdida de carga o a fenómenos como la cavitación que afecta la estabilidad de los componentes del sistema ocasionado ruidos, golpeteos, vibraciones y erosiones de material, que desencadenan en daños definitivos en dichos componentes que deberán ser reemplazados posteriormente. De igual manera y considerando la relación entre la presión y la velocidad en las redes, es importante respetar los rangos establecidos para las velocidades en tubería, especialmente cuando un proyecto nuevo pretende incorporarse a una red existente, evitando la afectación en la entrega o funcionamiento de suministro.

## 6.2 DESAFÍOS EN LA PRÁCTICA PROFESIONAL

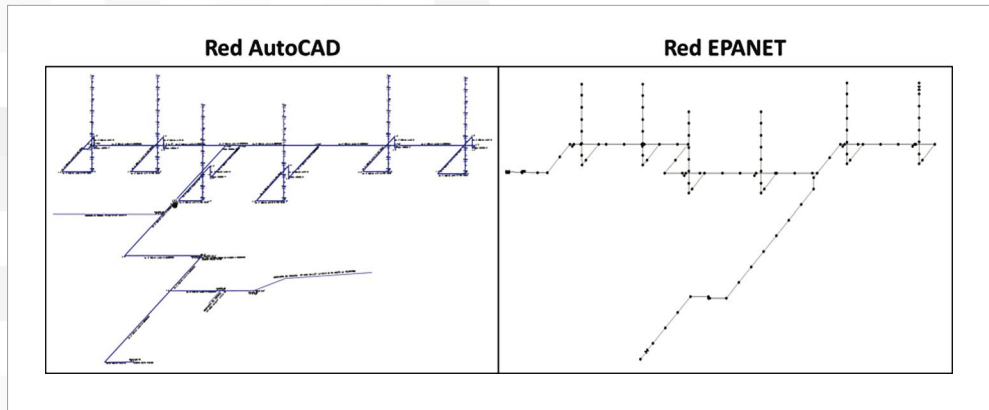
Considerando que Epanet es un software utilizado internacionalmente tanto en investigaciones académicas como en proyectos públicos y privados, orientados al mejoramiento de la gestión del recurso hídrico y cuenta con el respaldo de la EPA, se hace conveniente emplearlo para estudios en el país. Sin embargo, cabe resaltar que surgen retos relacionados a la implementación del software, especialmente en redes existentes y de gran dimensión; en los casos contrarios su método manual de dibujo no es complejo, permitiendo al usuario estructurar una red fácilmente, inclusive cargando una imagen como base y comenzar la red desde el inicio, este es un escenario ideal para la distribución de agua de un municipio o corregimiento que inicia los estudios para una red nueva, no obstante estos escenarios son escasos y cada vez menos, debido a la acelerada necesidad de acceso a agua potable, no obstante es posible encontrarlos con frecuencia en nuevas construcciones como centros empresariales o conjuntos residenciales, que consideran esencial la evaluación hidráulica en las redes.

Para los casos de las redes existentes o de gran dimensión como los acueducto urbanos, realizar el esquema detallado de la red se torna en una labor ardua, considerando los cientos de nodos y tuberías con diferentes características fundamentales en la simulación como, diámetros, longitudes, cotas, demandas; la manipulación de este gran volumen de información, aumenta el riesgo de errores en los datos de entrada y por consiguiente resultados alejados de la realidad, una solución para optimizar el tiempo estructuración de la redes existentes, es el software EpaCAD desarrollado por el ITA (Instituto Tecnológico del Agua) de la universidad politécnica de Valencia, que permite el reconocimiento sencillo de diseños asistidos por computadora en formatos DFX (comúnmente desarrollados en el software de AutoCAD), permitiendo su interpretación en Epanet y reconociendo de forma automáticamente las principales propiedades de los elementos que componen la red, facilitando en gran medida el trabajo necesario para su generación (Instituto Tecnológico del Agua, 2020). A continuación, se visualiza la interpretación del software EPACAD.



**Figura 76** Red acueducto Choachí AutoCAD/EPACAD.

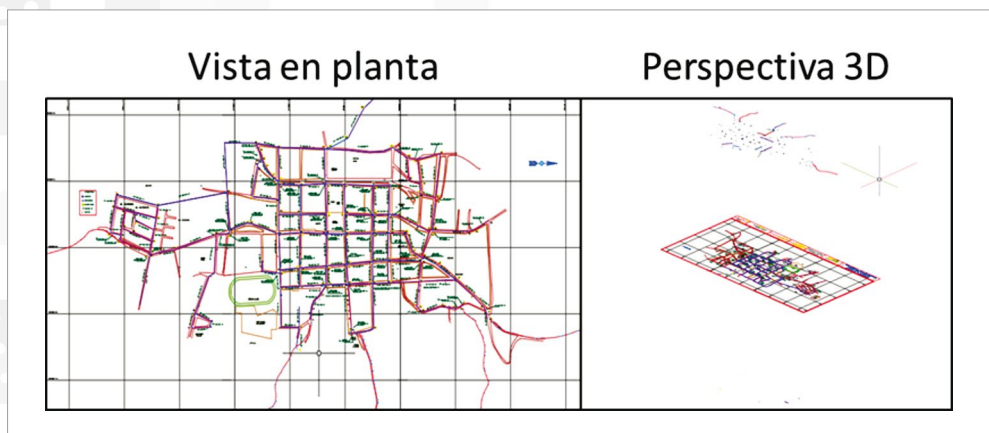
Fuente: EMSERCHOACHÍ, 2016.



**Figura 77** Red acueducto conjunto residencial AutoCAD/EPACAD.

Fuente: IGAMEG INGENIERÍA, AMBIENTE Y ENERGÍA LTDA, 2020.

Como se observa en las anteriores imágenes, el software EPACAD permite reconocer rápidamente la geometría de la red y sus diferentes componentes, inclusive dependiendo de la georreferenciación del archivo transformado, se mantienen el origen de las coordenadas calculando de igual forma las distancias entre sus componentes. No obstante, si el diseño tiene información sin depurar esta también generara ruido en el software de modelación; existen casos de conductos y nodos repetidos o con elevaciones erróneas, que desde la perspectiva en planta no se evidencian sin embargo al emplear EPACAD exportará estos errores al modelo hidráulico, debido a esto se recomienda tener el pleno control y conocimiento de los archivos que se exporten, en la siguiente imagen se evidencia errores de este tipo.

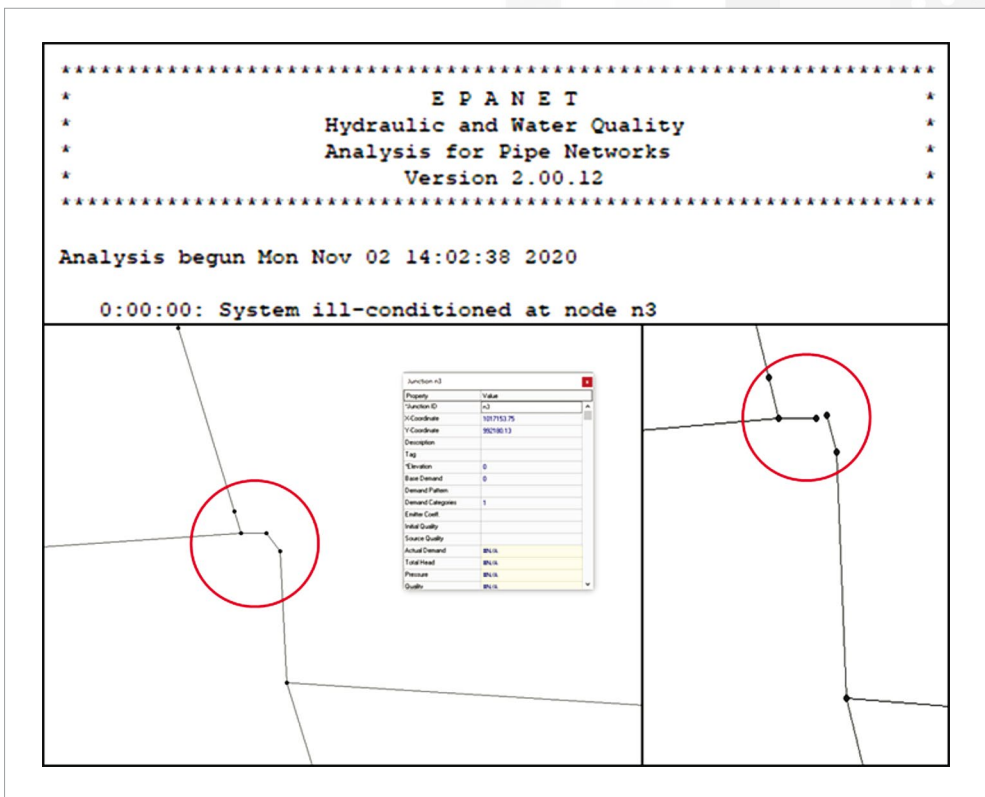


**Figura 78** Visualización de errores que afectan EPACAD.

Fuente: EMSERCHOACHÍ, 2016.

Se evidencia que, en una perspectiva tridimensional, algunos elementos de la red tienen sus respectivas elevaciones y otras inician en 0, de igual forma muchos se superponen, características que en la vista en la planta no se logran evidenciar, sin embargo, al generar la exportación estos elementos serán duplicados ocasionando fallas en el modelo hidráulico, relacionadas principalmente a la desconexión de nodos y tuberías.

En la figura 79 se menciona el error asociado a estos nodos, como mal condicionados, desconectados entre otros, en la figura izquierda se ve el nodo respectivo aparentemente conectando las tuberías, no obstante, al mover su posición se evidencia una sobre posición de nodos que mantiene la red desconectada.



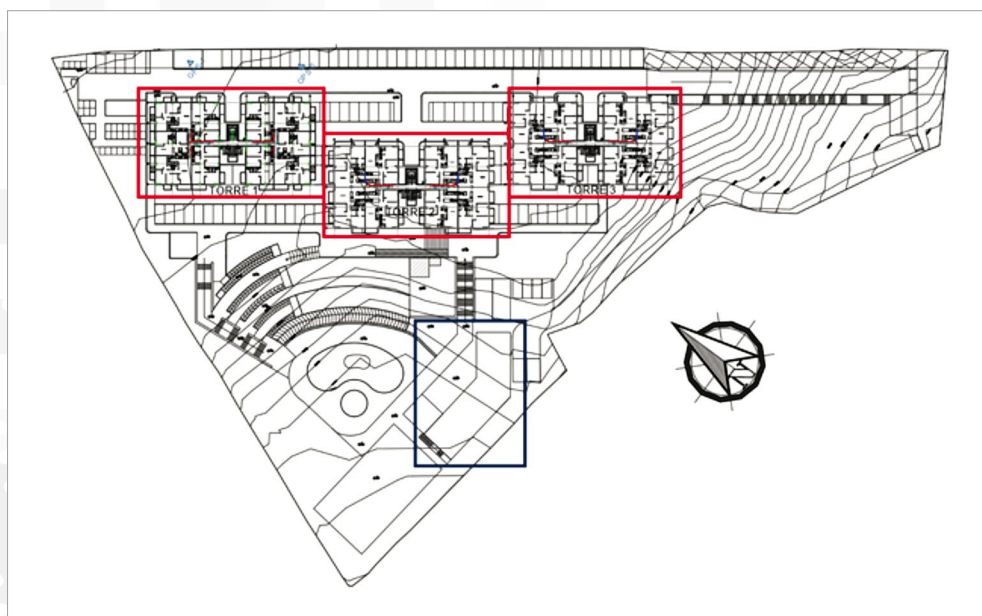
**Figura 79** Desconexión de nodos convertido por EPACAD.

Fuente: Software EPANET, 2020

Se puede concluir, que la herramienta de conversión que brinda EPACAD es muy útil para reducir considerablemente los tiempos y errores al plasmar el esquema de una red en Epanet, sin embargo, se debe tener en consideración la depuración de datos que pueden generar ruido en el modelo.

### 6.3 ESTUDIOS DE CASO: RED DE SUMINISTRO POTABLE Y CONTRA INCENDIO EN APARTAMENTOS MUNICIPIO DE VILLETA

Este proyecto consiste en realizar el modelamiento hidráulico de la red de suministro de agua potable y la red contra incendios para 3 torres de apartamentos, cada una con 2 edificaciones de 9 pisos proyectados en el municipio de Villeta Cundinamarca. En la siguiente figura se evidencian 3 recuadros en color rojo, que contienen las respectivas torres que se evaluaron y el en el recuadro azul se ubica el salón comunal, al cual se le debe garantizar el suministro de igual forma.



**Figura 80** Vista en planta torres de apartamentos.

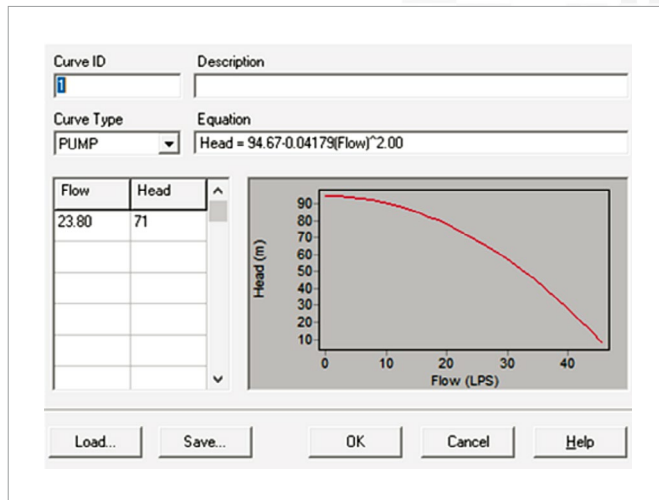
Fuente: IGAMEG INGENIERÍA, AMBIENTE Y ENERGÍA LTDA, 2020.

#### 6.3.1 Equipo de presión Bomba

Con base a las necesidades de suministro de agua y de la red contra incendio, se calcula la potencia de la bomba requerida, este cálculo de potencial para equipos de presión se realiza considerando la altura estática de descarga, las pérdidas de descarga y el caudal, una vez definido este valor se ingresa en el Software. Sin embargo, existen otras alternativas que pueden ser empleadas para definir la bomba.

*Ejm 1:* En casos que la bomba existente no esté cumpliendo al 100% el suministro de agua, se puede realizar empíricamente su cálculo a través del modelo cambiando los valores y visualizando los resultados hasta alcanzar la eficiencia requerida, para

lo cual se requiere la experiencia del modelador con respecto a las características de las bombas que pueden funcionar en un proyecto con determinadas características.



**Figura 81** Curva de la bomba software EPANET.

Fuente: software EPANET, 2020.

*Ejm 2:* Reemplazar la curva de la bomba por su potencia en H.P (Horsepowers) a partir de las fichas técnicas de los equipos, el software permite ingresar los valores de H.P facilitando la modelación de determinada bomba en el sistema

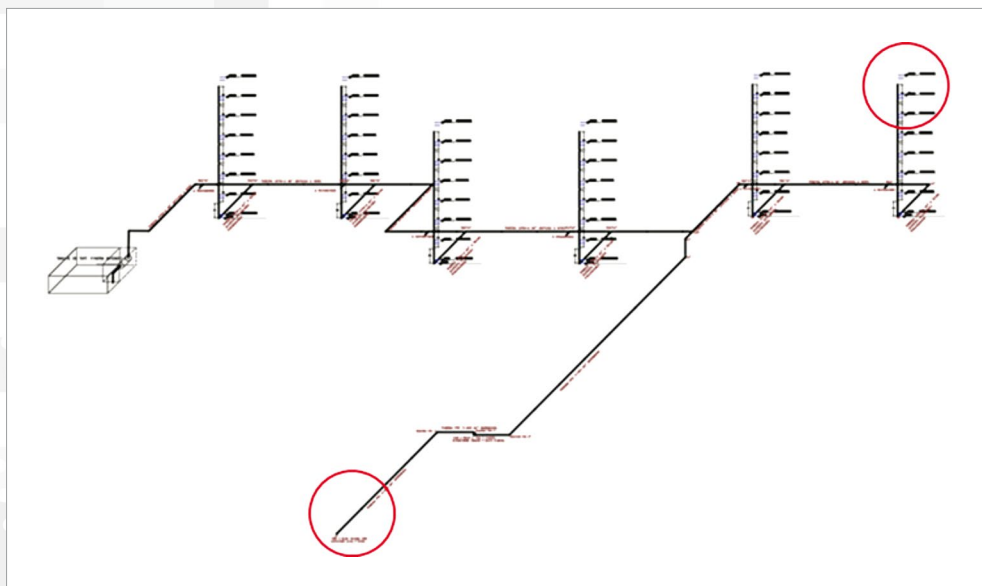
Property	Value
*Pump ID	Bomba
*Start Node	TAN
*End Node	1
Description	
Tag	
Pump Curve	
Power	38
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	
Price Pattern	
Flow	24.00
Headloss	-161.53
Quality	0.00

**Figura 82** Horsepowers de la bomba software EPANET.

Fuente: software EPANET, 2020

### 6.3.2 Red de suministro contraincendios y agua potable

Para la modelación hidráulica de los escenarios de red contraincendios y suministro de agua potable, se requiere garantizar que la distribución en los sistemas tenga la capacidad de llegar al punto más lejano del proyecto, en este proyecto específico, existen dos puntos considerados como los más lejanos: el último piso de la sexta edificación (Torre 3) y el salón Comunal. (Ambos referenciados con una circunferencia de color rojo).



**Figura 83** Suministro red contraincendios y agua potable.

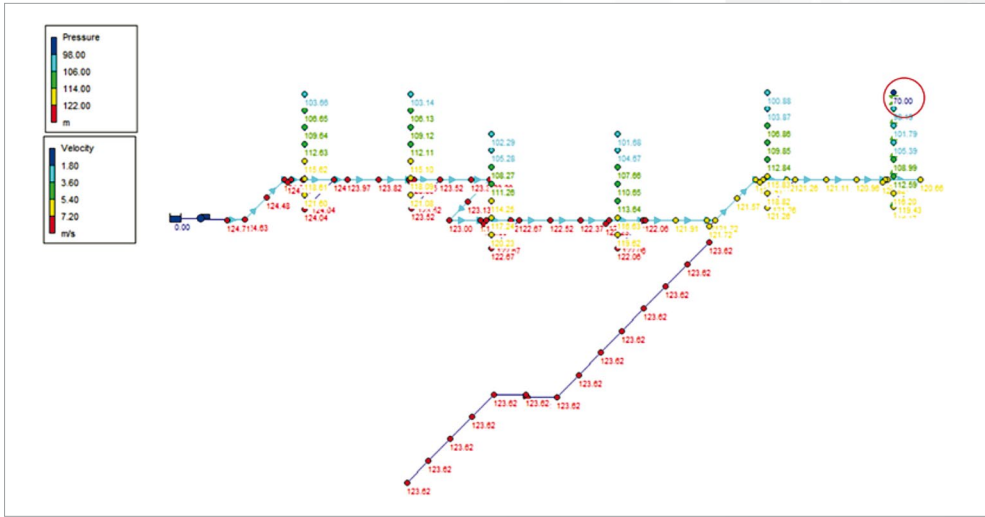
Fuente: software EPANET, 2020.

### 6.3.3 Resultados del modelo en EPANET Red contraincendios

Considerando que se realizó un prediseño a través de memorias de cálculo, se emplea el software con la finalidad de corroborar que la red cumpla las condiciones técnicas establecidas, en este caso específicamente la presión no debe sobrepasar los 100 PSI (pounds-force per square inch- presión de aire por libra por pulgada cuadrada).

Como se puede observar en la figura, es necesario implementar una válvula reguladora de presión para cumplir con los criterios de diseño. Según se evidencia, no es necesario realizar el ejercicio de asignación de válvulas para cada torre, considerando que la ruta crítica en la cual se debe garantizar el suministro es la última edificación, precisamente la más alejada de la bomba del sistema

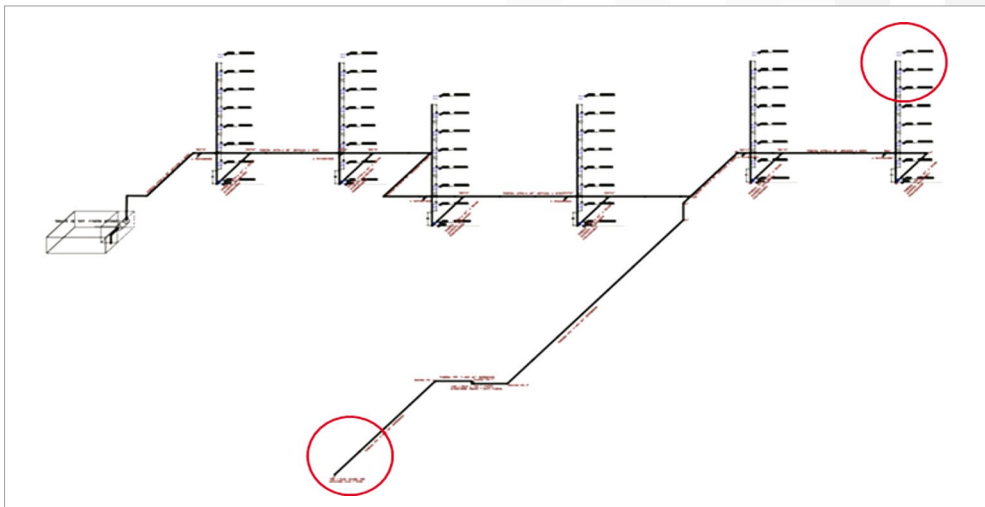




**Figura 84** Resultados red contraincendios - última torre.

Fuente: autoría propia.

En la Figura 85 se puede observar con mayor detalle el componente asignado como válvula reguladora y la reducción en la presión, cabe destacar que el software está configurado por defecto para tomar las presiones en metros de columna de agua (m.c.a), por lo cual fue necesario realizar una conversión definiendo que: 70 m.c.a equivalen aproximadamente a 100 psi, cumpliendo los requerimientos en cuanto a las presiones establecidas por el diseñador.



**Figura 85** Resultados red contraincendios - última torre visualización válvula.

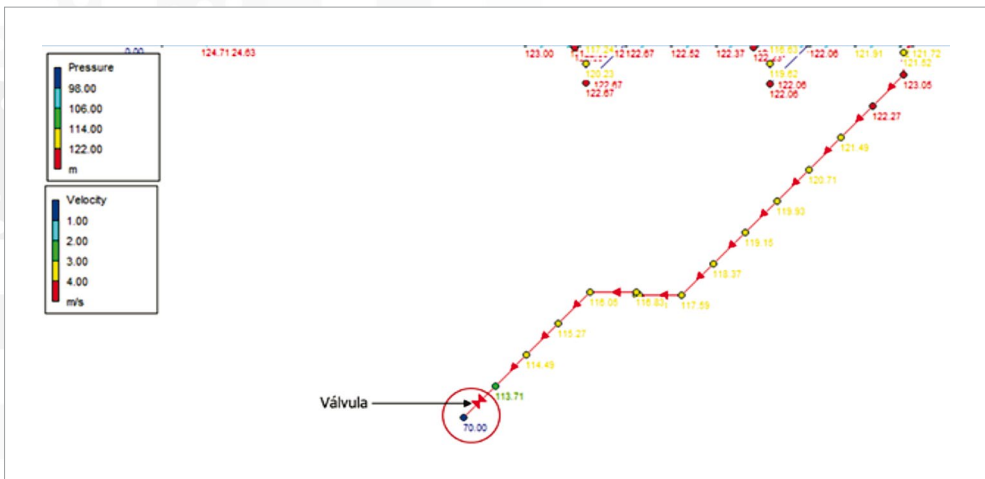
Fuente: elaboración propia.

El siguiente punto crítico es el salón común, el cual esta considerablemente alejado de la red principal de las torres, de igual forma en las figuras 86 y 87 se puede evidenciar la presión máxima establecida y las válvulas reguladoras que se requieren:



**Figura 86** Resultados red contraincendios - Salón comunal.

Fuente: autoría propia.



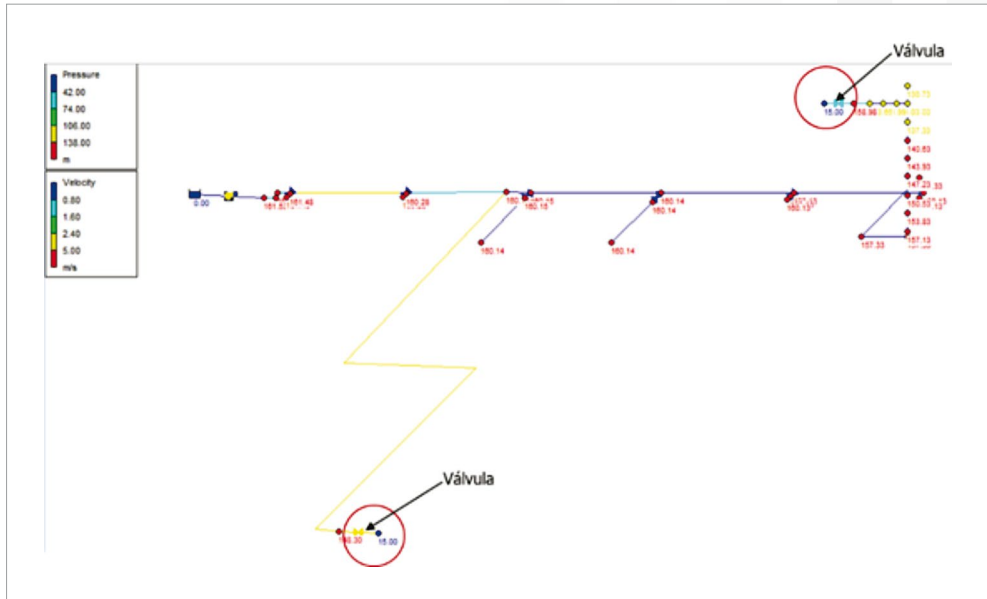
**Figura 87** Resultados red contraincendios - Salón comunal visualización válvula.

Fuente: autoría propia.

### 6.3.4 Resultados del modelo en EPANET Red Agua potable

Para el caso de la red de suministro de agua potable, se siguen los mismos criterios que la red contraincendios establecidos por el diseñador, en este caso la presión

debe ser inferior, alrededor de 15 m.c.a, considerando que se evalúa el suministro a la ducha más alejada del sistema, es decir en el último piso de la última torre y de igual forma un lavaplatos del salón comunal, las presiones deben ser inferiores considerando que si se someten estos componentes pueden ser estropeados por sobrepresiones. En la Figura 88 se evidencia la reducción de la presión gracias a la válvula reguladora asignada tanto en la ducha del último piso de la torre como en el lavaplatos del salón comunal.

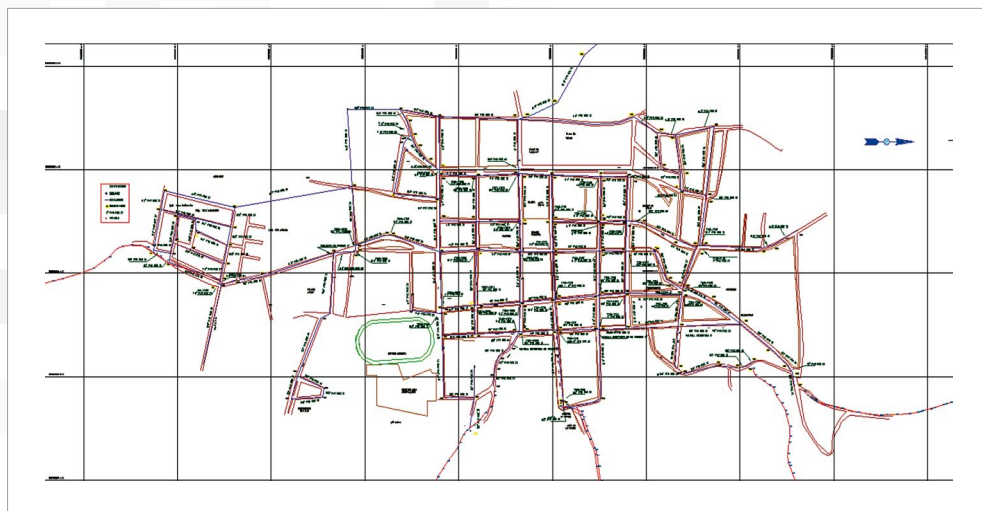


**Figura 88** Resultados red potable - Salón comunal visualización válvula.

Fuente: autoría propia.

#### 6.4 ESTUDIOS DE CASO: RED ACUEDUCTO MUNICIPAL DE CHOACHÍ-CUNDINAMARCA

Se desarrolla un modelo para evaluar el funcionamiento de la red del municipio de Choachí en el departamento de Cundinamarca, con fines académicos buscando la mejor opción para establecer las condiciones óptimas bajo las cuales debe operar el sistema y la posibilidad de ubicar un tanque de almacenamiento alternativo, reduciendo el impacto en la red. En la siguiente figura se evidencia la red general del acueducto del municipio facilitada por la empresa encargada del suministro EMSERCHOACHÍ.



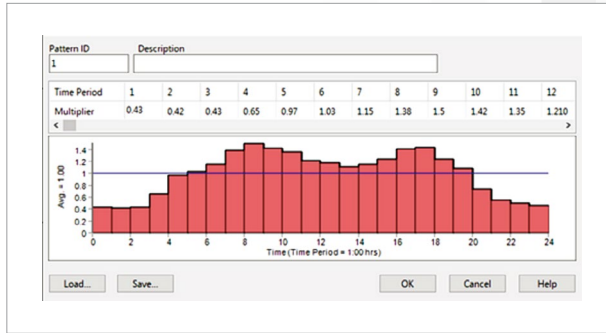
**Figura 89** Red acueducto municipal Choachí.

Fuente: EMSERCHOACHÍ, 2016.

#### 6.4.1 Curva de modulación de demanda

Generalmente, para evaluar las condiciones de una red contraincendios o urbanizaciones se puede prescindir de una variedad en la demanda, considerando que el diseñador tuvo en cuenta la población máxima que puede habitar o las condiciones máximas que pueden presentarse en este sistema cerrado. No obstante, al evaluar las condiciones de una red considerablemente mayor como un municipio o ciudad las variables en la demanda son considerables, especialmente por el crecimiento poblacional o el aumento de industrias que requieren un mayor suministro principalmente, debido a esto, es fundamental realizar estudios en la demanda de un sistema grande para poder evaluar y proyectar el funcionamiento de la red, especialmente la red principal del municipio o ciudad que a diferencia de una urbanización, no tiene un población definida y generalmente tiende a aumentar el consumo y la demanda.

En la Figura 90 se evidencia un factor por cada hora del día el cual tiene como función aumentar o disminuir la demanda en todos los nodos de la red, no obstante, es importante definir que si se cuenta con la información de consumos sectorizados o por zonas se pueden incluir varias curvas de modulación de caudal y asociarse a puntos específicos de la red. Para este caso, se empleó una curva de modulación típica del consumo de un acueducto, en la cual se refleja que los mayores consumos se establecen en las horas pico entre 7 y 8 de la mañana y 5 y 6 de la tarde, horas típicas en que el núcleo familiar realiza sus actividades cotidianas antes de salir o llegar de sus respectivos sitios de trabajo o estudio.



**Figura 90** Curva de modulación de demanda.

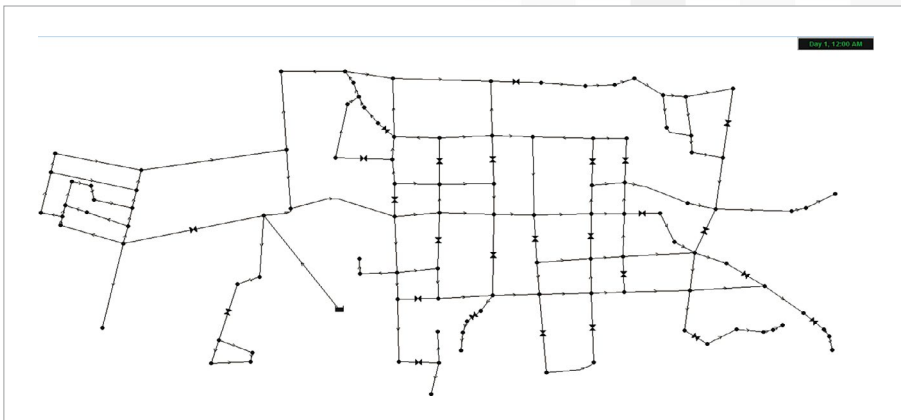
Fuente: autoría propia.

Esta curva de modulación de demanda será empleada para lo que se conocen como modelos dinámicos de una red, los cuales precisamente tiene una variabilidad en su funcionamiento relacionado a las diferentes horas del día y su consumo

## 6.4.2 Modelamiento Redes estáticas y dinámicas 2015 - 2040

### 6.4.2.1 Red estática 2015

De acuerdo a los datos obtenido por el programa de modelación EPANET, se evidencia que gran parte de los nodos de la red de acueducto del municipio de Choachí se encuentran sobrepresurizados, información confirmada por la empresa prestadora del servicio en el año 2016, posteriormente se opta por realizar el modelo dinámico activando las válvulas reductoras de presión, para observar los cambios de acuerdo a la curva de modulación de consumos horarios y el efecto que las válvulas tienen en la red.

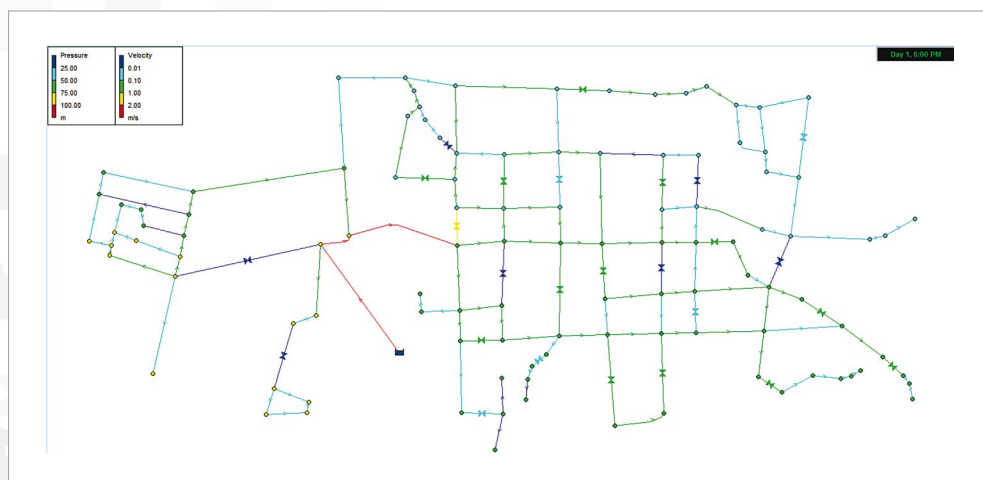


**Figura 91** Red estática 2015.

Fuente: autoría propia.

### 6.4.2.2 Red dinámica 2015

Después de activar las válvulas reductoras de presión, se evidencia una disminución significativa de las presiones en cada uno de los nodos cumpliendo el máximo de 60 metros de columna de agua, establecido por el RAS 2000 bajo el cual evaluó inicialmente el modelo. No obstante, de acuerdo a la resolución 330 de 2017 - RAS 2017 (norma actual), la presión mínima en tuberías es de 10 m.c.a y la máxima está relacionada al material y determinada por el fabricante. Sin embargo, en la hora con menos consumos las presiones aumentan, por lo cual se sugiere tener un mayor control de las válvulas en ese horario.



**Figura 92** Red dinámica 2015.

Fuente: autoría propia.

### 6.4.2.3 Red Estática 2040

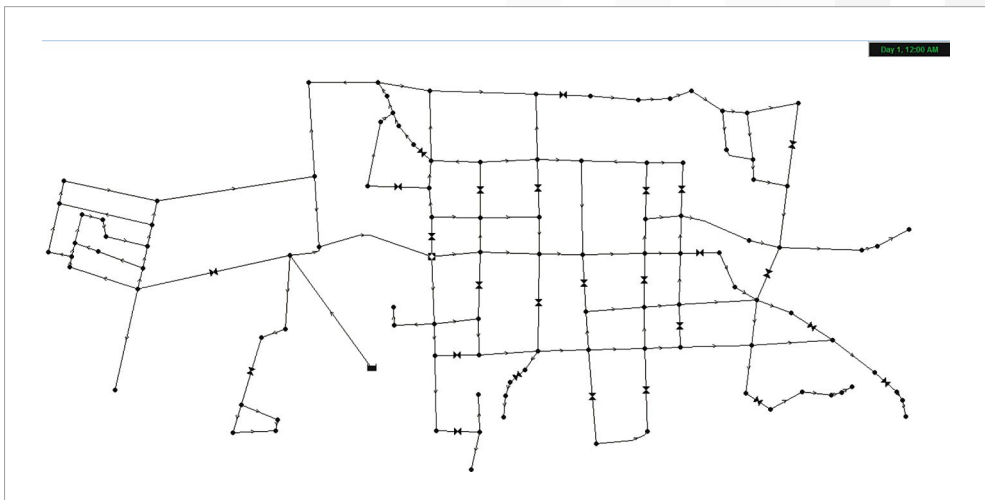
Teniendo en cuenta la demanda bruta proyectada para el año 2040 y la proyección poblacional del municipio, la cual tienen a disminuir de acuerdo con la tabla 68 Proyecciones poblacionales Choachí, se determina demanda de cada nodo.

**Tabla 67** Proyecciones poblacionales Choachí.

Choachí	Proyecciones poblacionales Choachí							
	Año (T)	Habitantes	Método Aritmético	Método Logarítmico	Método Geométrico	Método de Wappaus	Promedio	Promedio a utilizar
Datos censales	2005	11.165					11.165	11.165
	2010	10.970					10.970	10.970
	2015	10.729					10.729	10.729
Proyecciones	2020		10.511	10.532	10.532	2020		10.511
	2025		10.293	10.348	10.348	2025	3.786	10.293
	2030		10.075	10.177	10.177	2030	3.874	10.075
	2035		9.857	10.018	10.018	2035	3.963	9.857
	2040		9.639	9.871	9.871	2040	4.054	9.639

Fuente: DANE, 2015.

Después de realizar la calibración de las demandas se observa que debido a la disminución del Caudal Máximo Diario se ven afectadas las presiones y las velocidades, sin embargo, permanece el incumplimiento con los valores óptimos para el funcionamiento adecuado de la red. De igual forma se verifica realizando la red dinámica proyectada para el año 2040, teniendo una idea más acertada del comportamiento de la red para dicho periodo.



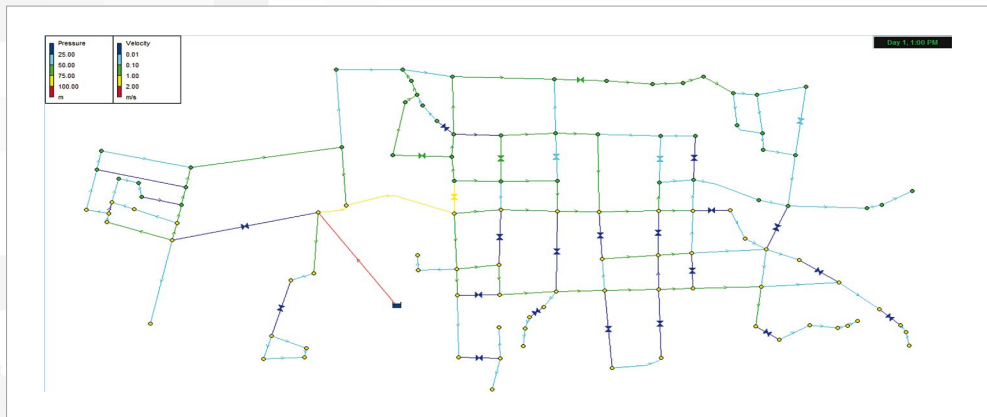
**Figura 93** Red estática 2040.

Fuente: autoría propia.

#### 6.4.2.4 Red dinámica 2040

Finalmente se evidencia que, en los horarios de bajo consumo, las presiones podrían afectar el estado de la red y las velocidades del flujo son demasiado bajas, esto considerando la disminución proyectada para la población, por lo cual se determina que para este periodo se debe hacer ajustes con el fin de garantizar el servicio a la población abastecida.

**Figura 94** Red dinámica 2040.



Fuente: autoría propia.

#### 6.4.2.5 Recomendaciones

- Es importante verificar constantemente la demanda poblacional, considerando que se presenta un decrecimiento para los siguientes años, no obstante, esta condición podría variar en el municipio dependiendo de las condiciones de la región y sus posibles avances en materia económica, ocasionando una tendencia de aumento en nuevos pobladores.
- Debido a la problemática existente en la red con respecto a las altas presiones en determinadas horas del día, se recomienda establecer el control de las válvulas en dichos horarios, con el fin de evitar deterioros en la red.
- Debido a las altas presiones en los nodos, la velocidad del flujo en las tuberías es deficiente, por ello se resalta la importancia de controlar las presiones, ya sea disminuyendo los diámetros de las tuberías o regulando la capacidad de las válvulas para reducir la presión.
- Se sugiere evaluar la ubicación de un nuevo tanque de almacenamiento que aporte flujo de agua al extremo de la red para alivianar las cargas, reduciendo parcialmente las altas presiones, además de tener un resguardo en caso de fallas en el suministro o mantedamientos.
- Es importante realizar revisiones periódicamente y arreglos erradicando en lo posible las fugas en el sistema, con el fin de disminuir las pérdidas técnicas en la red.



## ANEXOS CAPÍTULO 2



### ANEXO A. BASE CARTOGRÁFICA

Anexo A1. Mapa municipio de La Vega.

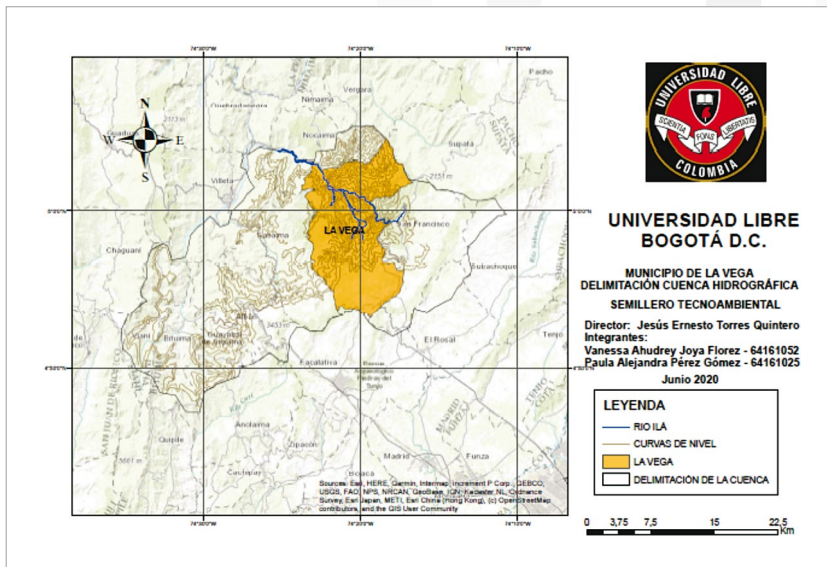
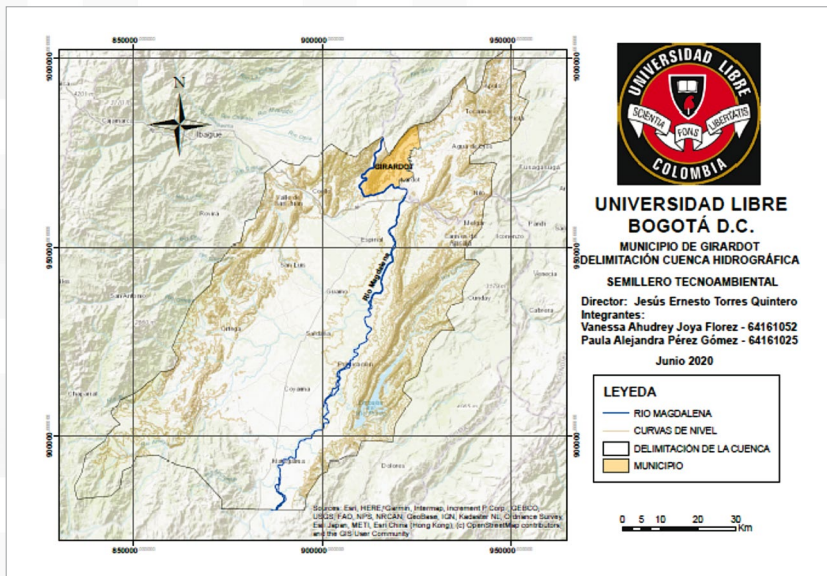


Figura 95 Mapa de la cuenca del río Ilá.

Fuente: autoría propia, 2020.

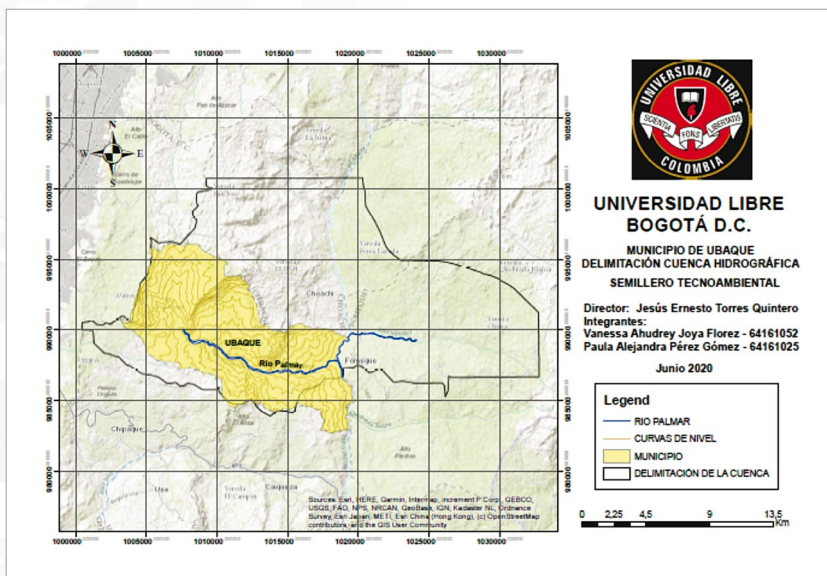
Anexo A2. Mapa municipio de Girardot.



**Figura 96** Mapa de la cuenca del río Magdalena.

Fuente: autoría propia, 2020.

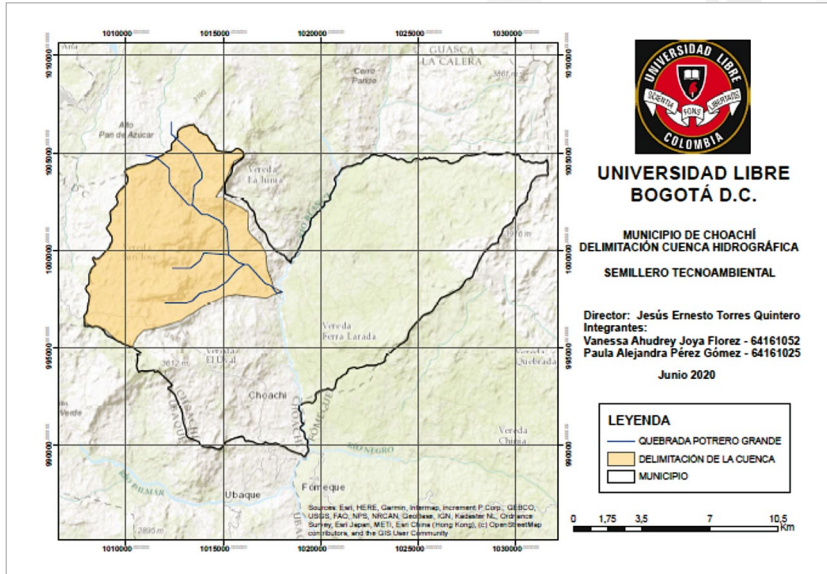
Anexo A3. Mapa municipio de Ubaque.



**Figura 97** Mapa de la cuenca del río Palmar.

Fuente: autoría propia, 2020.

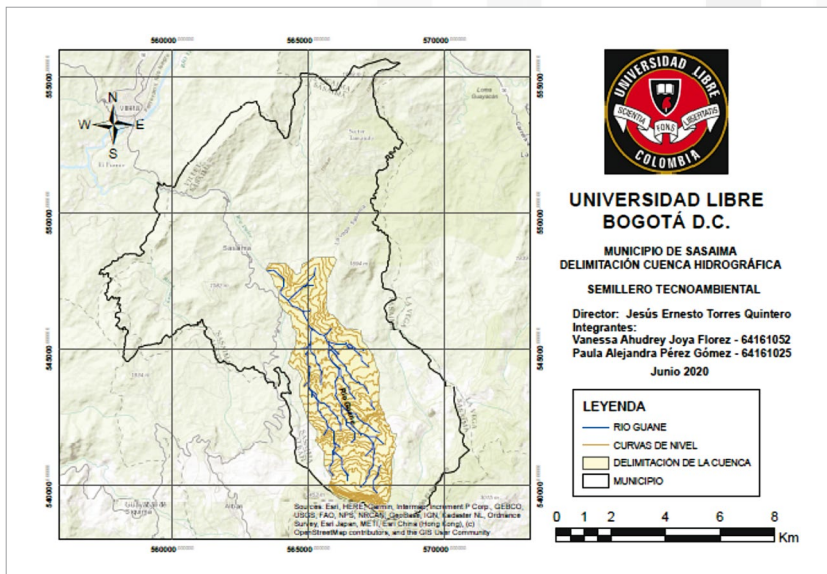
Anexo A4. Mapa municipio de Choachí.



**Figura 98** Mapa de la cuenca del río Guane.

Fuente: autoría propia, 2020.

Anexo A5. Mapa municipio de Sasaima.

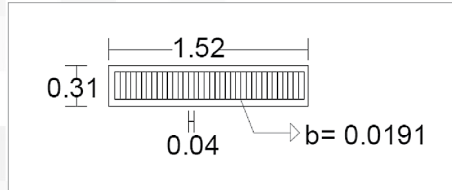


**Figura 99** Mapa de la cuenca del río Guane.

Fuente: autoría propia, 2020.

## ANEXO B. PLANOS DE LA BOCATOMA

### Anexo B1. Rejilla bocatoma de Sasaima.

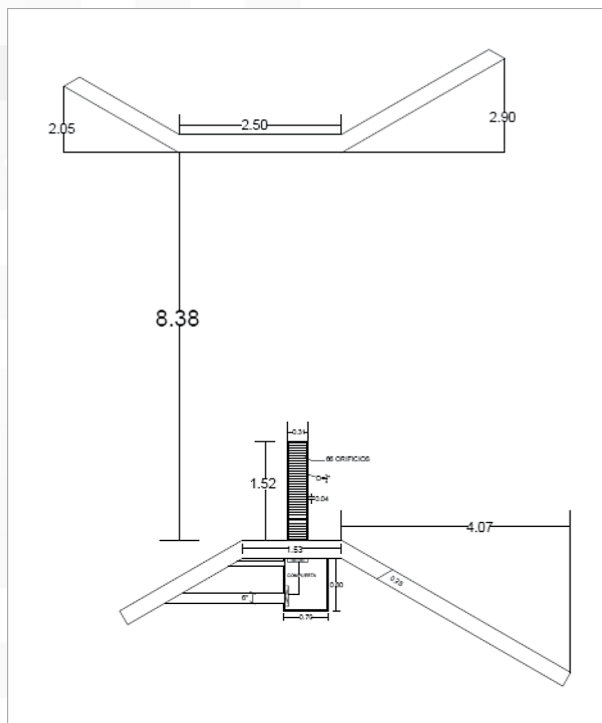


**Figura 100** Rejilla

Fuente: autoría propia, 2020.

Nota: todas las dimensiones en metros. Dibujo sin escala.

### Anexo B2. Diseño del perfil de la planta de la bocatoma de Sasaima.

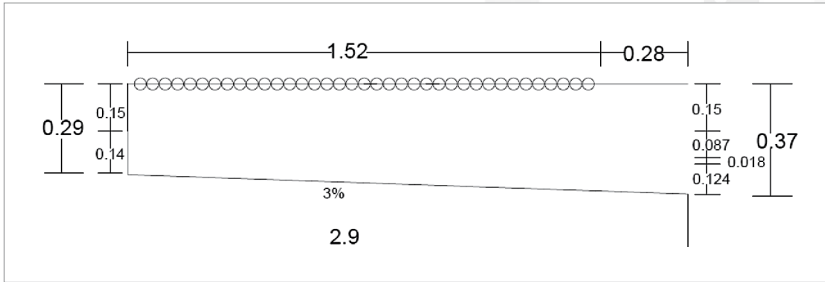


**Figura 101** Diseño de la presa.

Fuente: autoría propia, 2020.

Nota: todas las dimensiones en metros. Dibujo sin escala.

Anexo B3. Aducción de la bocatoma de Sasaima.

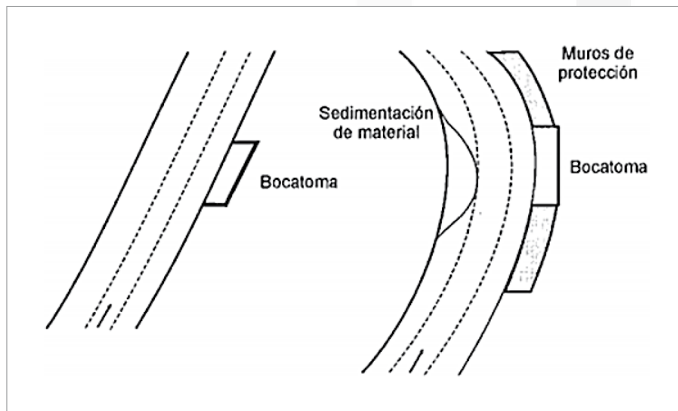


**Figura 102** Aducción de la bocatoma.

Fuente: autoría propia, 2020.

Nota: todas las dimensiones en metros. Dibujo sin escala.

Anexo B4. Bocatoma de Girardot.



**Figura 103** Bocatoma de Girardot.

Fuente: López, R.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Aguinaga, S. (1999). *Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014*, de Ministerio de vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual\\_dinama.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf)

Alberro N., Frías D., Valcárcel L. (2010). *El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos*. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente, vol. 3, no. 18, pp. 1-5. Cuba. <http://repositorio.geotech.cu/>

Alcaldía de Choachí Cundinamarca. (15 de junio de 2012). *choachi-cundinamarca*. Obtenido de nuestro municipio: [http://www.choachi-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.choachi-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml)

Alcaldía Municipal de Choachí Cundinamarca (s.f). *Nuestro municipio*. <http://www.choachi-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>

Alcaldía Municipal de Girardot - Cundinamarca (2016). *Plan de acción territorial para la prevención, atención asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado*. <http://www.girardot-cundinamarca.gov.co/Transparencia/Planeacion-GestionyControl/Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20Territorial%20Girardot%202016%20-%202019.pdf>

- Alcaldía Municipal de Sasaima. (2011). *Esquema de Ordenamiento Territorial Sasaima*. Sasaima. Alcaldía Municipal de Sasaima. (2013). *Información general*. Sasaima. <http://www.sasaima-cundinamarca.gov.co/>
- Alcaldía Municipal de Sasaima (2016). *Acuerdo No. 007. Por el cual se adopta el plan de desarrollo - Sasaima, Social y Participativa 2016-2019*. P. 38-47. <https://sasaimacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/>
- Alcaldía municipio de La Vega (s.f.). *Información del municipio*. <http://www.lavega-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alterburger, R., Brack, W., Burgess, R., Busch, W., Escher, B., Focks, A., . . . Backhaus, T. (2019). Future water quality monitoring: improving the balance between exposure and toxicity assessments of real-world pollutant mixtures. *Environmental Sciences Europe*, 17.
- American Public Health Association [APHA]; American Water Works Association [AWWA] & Water Environment Federation [WEF]. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23RD Edition. Washington D. C. American public Health Association.
- APHA, AWWA y WPCF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20 ed.). U.S.A.
- ArcGISresources. (s.f.). Obtenido de ¿Qué es ArcGIS?: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Barrios E & Loreto D. (2003). *Alternativas y herramientas para la producción más limpia*.
- Anales de la Universidad Metropolitana*, vol. 3, no. 1, pp. 255-270. <https://dialnet.unirioja.es/>
- Beatriz Iermann de Abramovich, M. C. (s.f.). *Técnicas analíticas de oxígeno disuelto*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de *Técnicas analíticas de oxígeno disuelto*: <file:///C:/Users/user/Pictures/GIR-TecnicasAnaliticas-OxigenoDisuelto.pdf>
- Belmonte, S. I., & Campos, O. J. (s.f.).
- Benavides V., Tarlé T., Galbiatti J. (2009) *Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño-Colombia*. Ingeniería e Investigación, vol. 29, no. 3, pp. 97-101. <https://www.scopus.com/>
- Bohórquez, G. P. (2006). *Estructuración de la asociación de acueductos veredales en el municipio de Sasaima*. Bogotá: Universidad de la Salle.



- Botanical Online. (s.f.). *Botanical- Online*. Obtenido de Los Afluentes : <http://natura.botanical-online.com/afluentcastella.htm>
- Benavides V., Tarlé T., Galbiatti J. (2009) *Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño-Colombia*. Ingeniería e Investigación, vol. 29, no. 3, pp. 97-101. <https://www.scopus.com/>
- Brooks, D. B. (2004). *Agua: Manejo a nivel local*. Ottawa: Alfaomega.
- bvsde. (s.f.). Obtenido de Captacion de Agua superficial : <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/020867/020867-09.pdf>
- Cabo Laguna M. (2011). *Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción*. Trabajo de grado. Ing. Tec. Agrícola en explotaciones agropecuarias. Univ Pública de Navarra. Ingenieros Agrónomos. España.
- Calera, C. M. (2010). *Acuerdo Municipal No. 011* . Obtenido de [http://www.lacalera-cundinamarca.gov.co/Transparencia/BancoDocumentos/ACUERDO%20N\\_%20011%2027%20DE%20AGOSTO%20DE%202010%20POT.pdf](http://www.lacalera-cundinamarca.gov.co/Transparencia/BancoDocumentos/ACUERDO%20N_%20011%2027%20DE%20AGOSTO%20DE%202010%20POT.pdf)
- Campbell, S., Philips, J., Turkington, A., *Weathering and landscape evolution; The 35th Binghampton Symposium in Geomorphology*. 168 p., 2004. <https://www.elsevier.com/>
- CAR. (2008). *Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y zona crítica*. Bogotá.
- CAR. (Mayo de Agosto de 2010). *Corporación Autónoma Regional*. Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://www.car.gov.co/?idcategoria=12346>
- CAR. (Mayo de Agosto de 2010). *Corporación Autónoma Regional*. Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://www.car.gov.co/?idcategoria=12346>
- Caracol Radio . (20 de Marzo de 2009). La mitad de Colombia tiene problemas de abastecimiento de agua potable: Defensoría. Bogota , Colombia .
- Castany, G. (1967). *Traité pratique des eaux souterraines*. Paris: Dunod.
- Congreso de Colombia. (1973). Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/ley\\_0023\\_191273.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/ley_0023_191273.pdf)
- Congreso de Colombia. (1973). *Ley 23 de 1973*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9018#:~:text=Es%20objeto%20de%20la%20presente,los%20habitantes%20del%20territorio%20nacional>.
- Congreso de Colombia. (1997). *Ley 388 de 1997* . Obtenido de [http://www.secretaria-senado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0388\\_1997.html](http://www.secretaria-senado.gov.co/senado/basedoc/ley_0388_1997.html)

- Congreso de la República. (1993). Ley 99. Obtenido de <https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-99-1993#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones.>
- Connan, J., & Fadem, P. (2011). Guía comunitaria para la salud ambiental. En J. Connan, & P. Fadem. California.
- Constitución Política (1991). Obtenido de [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion\\_politica\\_1991.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html)
- Contraloría de Cundinamarca. (2019). *Agua Potable en Cundinamarca*. Obtenido de <http://www.chia-cundinamarca.gov.co/car/Informe%20ambiental%202019/TOMO%20II%20AGUA%20POTABLE.pdf>
- Contraloría General de la República (s.f.). *Estado de los recursos naturales y del ambiente*. Obtenido de [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/AVA\\_II-SEM-2014/Unidad\\_1/s.f.\\_Estado\\_de\\_los\\_recursos\\_naturales\\_y\\_del\\_ambiente.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/AVA_II-SEM-2014/Unidad_1/s.f._Estado_de_los_recursos_naturales_y_del_ambiente.pdf)
- Corcho Romero, F., & Duque Serna, J. I. (2005). *Acueductos teoría y diseño*. (L. Correa Restrepo, Ed.) medellin, Colombia: sello editorial, Universidad de Medellín.
- Corporación Autónoma Regional CAR. (2006). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusaca*. Bogotá.
- Corporinoquia (s.f). *Localización de la cuenca*. recuperado de: <http://www.corporinoquia.gov.co/sirh/index.php/diagnostico/localizacion-de-la-cuenca>
- Corte Constitucional de Colombia. (2013). *Acción de tutela para solicitar protección del derecho al agua*. Colombia.
- Cosgrove, W., & Loucks, D. (2015). Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51, 4823-4839.
- Cualla, R. A. (2003). *ELEMENTOS DE DISEÑO PARA ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS*. Bogotá: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.
- Cubillos, L., Naranjo J. (2018). *Diseño hidráulico de obras civiles para la captación y tratamiento de agua cruda del sistema de acueducto centro poblado la Magdalena municipio de Choachí, Cundinamarca*. Tesis Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16443/1/ACUEDUCTO%20%28Proyecto%20de%20grado%29.pdf>
- Cubillos L. y Naranjo J. (2018). *Diseño hidráulico de obras civiles para la captación y tratamiento de agua cruda del sistema de acueducto centro poblado la magda-*

*lena municipio de Quebrada Negra, Cundinamarca*. Trabajo de grado. Ing. Civil., Univ. Católica de Colombia. Bogotá D.C.

Cujabán García, D. M. (2013). *Zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea*. Artículo para publicación, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.

Curt, J. F. (s.f.). *Ciencias Marinas uvigo*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de Métodos Analíticos para aguas residuales : [http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia\\_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%20Anexos1.pdf](http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%20Anexos1.pdf)

DANE. (2015). *Censo poblacionales de Cundinamarca 1938-2005*. <https://www.dane.gov.co/>

Decreto Ley 2811 de 1974. *Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_2811\\_de\\_1974.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf)

Decreto 1323 de 2007. *Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH*. <https://diario-oficial.vlex.com.co/vid/decreto-353494338#:~:text=Decreto%201323%20de%202007%2C%20por%20el%20cual%20se%20crea%20el,Informaci%C3%B3n%20del%20Recurso%20H%C3%ADrico%2C%20SIRH.&text=Cr%C3%A9ase%20el%20Sistema%20de%20Informaci%C3%B3n,Informaci%C3%B3n%20Ambiental%20para%20Colombia%2C%20SIAC>.

Delgadillo A. Ferre C., Dugarte M. (2008). *Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas en escenarios de riesgo por crecidas*. Mérida., Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 56(1) 2015, 11-40

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2016). *Boletín Técnico Comunicación informativa. Encuesta Nacional de Calidad de Vida* (pp. 5 - 6). Bogotá. DANE.

EMSERCHOACHÍ. (16 de 10 de 2016). *Acueducto del Municipio de Choachi*. Choachi, Cundinamarca, Colombia.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2000). *Introducción a la ley de agua limpia*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: [http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion\\_a\\_la\\_Ley\\_de\\_Agua\\_Limpia.pdf](http://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Agua_Limpia.pdf)

EPA. (Septiembre de 1996). *Environmental Protection Agency*. Obtenido de <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/50000PFM.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&>

[Index=1995%20Thru%201999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField](#)

EPM. (2009). *normas de diseño de sistemas de acueducto de EPM*. Obtenido de [http://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro\\_de\\_documentos/NormasDisenoSistemasAcueducto.pdf](http://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/NormasDisenoSistemasAcueducto.pdf)

Escobar, H. (1986). *Hidrología Básica I*. Cali: Universidad del Valle.

INSIVUMEH (s.f). ¿Qué es hidrología? <https://insivumeh.gob.gt/institucional/que-es-hidrologia/>

Escobar R. (2018). *Plan Municipal de gestión del riesgo de desastres. Escuela Superior de Administración Pública*. P. 14-20. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/>

Escuela de Ingeniería . (s.f.). *Copernico* . Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de Practica de laboratorio de quimica- Analisis por espectrofotometria de absorcion: [http://copernico.escuelaing.edu.co/ceciba/dep\\_cnaturales/upload/file/Laboratorios/QUIM/ANALISIS%20ESPECTROFOTOMETRICO.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/ceciba/dep_cnaturales/upload/file/Laboratorios/QUIM/ANALISIS%20ESPECTROFOTOMETRICO.pdf)

Escuela de ingeniería de Antioquia. (2003). *Obras hidráulicas . Escuela de ingeniería de Antioquia*.

Franco, R., Llanos, H., & Gárfias, J. (2002). Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del río Lerna, estado de México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 115-126.

Gaitán Rodríguez, J., & López Quintero, L. (2003). *Estudio de técnicas nucleares aplicadas al agua subterránea*. Trabajo de Grado, Universidad Libre, Ingeniería Ambiental, Bogotá.

Gallego A., Carvajal F. (2017). *Regionalización de curvas de duración de caudales en el departamento de Antioquia - Colombia., Revista EIA, ISSN 1794-1237, vol. 14, ed. N.27, pp. 21-30*. Universidad EIA, Envigado (Colombia). DOI: <https://doi.org/10.24050/reia.v14i27.1158>

Galvis, R. Saavedra, M (2014). *Evaluación del acueducto del municipio de Sasaima-Cundinamarca, desde la captación hasta la planta de potabilización*. Repositorio Universidad Libre. Bogotá. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9488/Proyecto%20Sasaima-Saavedra,%20Galvis.pdf?sequence=3>

Ganora D., Claps P., Laio F., y Viglione A. (2009). *An approach to estimate nonparametric flow duration curves in ungauged basins*. *Water Resources Research*, vol. 45, no. 10. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR007472>

- García, C. A., García, J. C., Rodríguez, J. P., Pacheco, R., & Garcia, M. C. (2018). Limitaciones del IRCA como estimador de calidad del agua para consumo humano. *Revista Salud Pública*, 204-207.
- García, M. (2010). *Balance Hídrico de las aguas subterráneas*. Cali.
- García, P. A. (26 de Enero de 2013). *Slideshare*. Obtenido de Erosion y socavacion : <http://es.slideshare.net/PaulAyamamaniGarcia/8-erosin-y-socavacin>
- Gaspari F., Rodríguez A., Senisterra G., Denegri G., Delgado M., Basteiro S. (2013). *Caracterización morfológica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina*. AUGMDOMUS, vol. 4, pp. 144-156, 2013. <http://sedici.unlp.edu.ar/>
- Gobernación de Cundinamarca (2012). *Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013*. Capítulo 5 - Servicios públicos. P 145-146. <http://www.cundinamarca.gov.co/>
- Gómez S. y Guzmán J. (2011). *Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija*. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 61 pp. 41-52. Diciembre, 2011 (p43)
- González B, L. J., & Sarmiento D, N. M. (2017). *Universidad Santo Tomás*. Obtenido de Evaluación quimiométrica del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo Humano en Bucaramanga, Floridablanca y Girón: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10792/Nestor%20Sarmiento-Leidy%20Gonzalez-2017.pdf?sequence=1>
- Graus. (2017). *Significado de Hidráulica*. recuperado de: <https://www.significados.com/hidraulica/>
- Grizztti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 10.
- Guasca, C. M. (2017). *Acuerdo No 36 de 2017*. Obtenido de [http://concejojasca.micolombiadigital.gov.co/sites/concejojasca/content/files/000021/1050\\_acuerdo-no-36-de-2017-objetado-y-archivado.pdf](http://concejojasca.micolombiadigital.gov.co/sites/concejojasca/content/files/000021/1050_acuerdo-no-36-de-2017-objetado-y-archivado.pdf)
- Guasca, C. M. (2019). *Proyecto de Acuerdo "Por el cual se adopta la revisión general y ajuste del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Guasca"*. Obtenido de [https://guascacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/guascacundinamarca/content/files/000294/14697\\_tomoi\\_proyecto\\_acuerdo.pdf](https://guascacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/guascacundinamarca/content/files/000294/14697_tomoi_proyecto_acuerdo.pdf)
- Guía ambiental para el subsector porcícola. (2002). *Ministerio de Ambiente*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/documentos/porc%C3%ADcola.pdf>
- Gutierrez, M. (2020). *Modelo de gobernanza y gestión del agua en la cuenca del río Cuja*.

- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Lima: Universidad católica de Perú Fondo.
- Henken, J. B. (2007). *University of kentucky - Uk*. Obtenido de ¿Que es una Línea divisoria de Aguas? : <http://www2.ca.uky.edu/enri/pubs/ENRI-132%20WhatisaWatershed%20spanish.pdf>
- Herrera, C. Poveda, M. (2014) *Evaluación de la red de acueducto y abastecimiento del municipio de Choachí Cundinamarca desde la captación hasta la planta de potabilización*. Repositorio Universidad Libre. Bogotá. <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/9513/PROYECTO%20DE%20GRADO%20EVALUACI%C3%93N%20DE%20LA%20RED%20DE%20ACUEDUCTO%20CHOACHI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ibáñez Asensio, S. M. (s.f.). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2014, de Riunet: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10780/Estima%20de%20la%20escorrent%C3%ADa%20de%20una%20cuenca%20peque%C3%B1a.pdf?sequence=1>
- Ibáñez, S., Moreno, H., Gisbert, J (s.f). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>
- Idarraga, F. L. (s.f.). *Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales*. Obtenido de Acueductos y Alcantarillados : [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo\\_5/Pages/captacion\\_superficial\\_continuacion.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_5/Pages/captacion_superficial_continuacion.htm)
- IDEAM. (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá.
- IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua. En C. O. Rodríguez, N. Omar Vargas, O. Jaramillo, A. Piñeros, & H. Cañas, *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- IDEAM. (2010). *Programa Nacional de Aguas subterráneas*. Recuperado el 30 de Enero de 2014, [dehttp://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosBiodiversidad/recurso\\_hidrico/aguas\\_subterranas/240912\\_plegable\\_aguas\\_subterranas.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosBiodiversidad/recurso_hidrico/aguas_subterranas/240912_plegable_aguas_subterranas.pdf)
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA*. Bogota.
- IDEAM. (s.f.). *Índice de calidad de agua en corrientes superficiales (ICA)*. Obtenido de Formato común hoja metodológica: [http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21\\_HM\\_Indice\\_calidad\\_agua\\_3\\_Fl.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031](http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_Fl.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031)

- IGAMEG INGENIERÍA, AMBIENTE Y ENERGÍA LTDA. (10 de 03 de 2020). *Red Potable Palmares de Guadalupe*. Villeta, Cundinamarca, Colombia.
- IGOV.CO (s.f). *Nuestro municipio*. recuperado de: <http://www.ubaque-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas. (s.f.). Obtenido de parámetros y características de las aguas naturales.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2003). *Gestión Ambiental. Evaluación del Desempeño Ambiental Directrices*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*, p 18. <http://igacnet2.igac.gov.co/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (s.f). *Municipio de Sasaima*. recuperado de: <https://igac.gov.co/es/noticias/la-movil-del-igac-visito-los-municipios-de-sasaima-y-villeta-en-el-departamento-de>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Consulta de planchas*. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/consulta-de-planchas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. (s.f.). *Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia- Indicadores de Calidad del Agua Superficial 10p*. Obtenido de [http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21\\_HM\\_Indice\\_calidad\\_agua\\_3\\_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031](http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2013). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00)*. Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Toma de muestras de aguas superficiales para la red de calidad del IDEAM*. Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). *Guía metodológica para la elaboración de Figuras geomorfológicas a escala 1:100.000*. IDEAM. Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. República de Colombia, p 2- 71. <https://www.invias.gov.co/>
- Instituto Tecnológico del Agua. (08 de 11 de 2020). *EPACAD*. Obtenido de EPACAD: <https://epacad.com/epacad-es.php>
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1999). *La contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Madrid: GRAFISTAFF, S.L.

L, O. (2010). *Treatment Technologies for Groundwater*. Denver, USA: American Water Works Association.

Lenntech. (s.f.). *LENNTECH*. Obtenido de Propiedades químicas del Molibdeno- Efectos del Molibdeno sobre la salud- Efectos ambientales del Molibdeno: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/mo.htm>

Ley 142 de 1994. *Secretaría Distrital del Hábitat Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2752>

Ley 9 de 1979. *De la Protección del medio ambiente*. [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf)

Ley 99 de 1993. *Por la 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*. <https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-991993#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones.>

Lopez Cualla, R. A. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

López Cualla (2003). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados*. Segunda Edición. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

López E. A., Rodríguez C. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca - Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Revista P+L*, vol. 12 no. 2, pp. 35-49, 2017. DOI: [10.22507/pml.v12n2a3](https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3).

López, R. (2003). *Elementos de diseño para acueducto y alcantarillado*. (6 ed.) ISBN 958-8060-36-2. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de ingeniería, 85-128 <https://insivumeh.gob.gt/institucional/que-es-hidrologia/>

Lux Cardona B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.

Trabajo de grado M.Sc. Mg. Energía y Ambiente. Univ. de San Carlos de Guatemala.

M C, S., M G, W., M, S., I D, O., G A, S., & D, B. (2011). *Aplicación del modelo DRASTIC en la cuenca del arroyo Las Conchas, Entre Ríos*. *Revista de investigación Agropecuarias*, 37, 150-158.

MA. (18 de Diciembre de 1974). *Ministerio de Agricultura*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec\\_2811\\_181274.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_2811_181274.pdf)



- MADS. (1974). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>
- Malik I., AL-Shammary S. H., AL-Hamzawy H. M.(2016). *Morphometric Analysis of Al-Chabab River Basin East of Iraq Using Remote Sensing and GIS Techniques*, IJSER, vol. 4, no. 3, pp. 54-58. <http://www.ijser.in/>
- Martínez H. (2018). *Caracterización hidrológica de la subcuenca del río Quirimán, en el cantón de Nicoya*. Trabajo de grado. Ing. Agrícola. Inst.Tecnológico de Costa Rica.
- Materón Muñoz H. (1997). *Obras Hidráulicas Rurales*. Primera Edición. Santiago de Cali – Colombia: Editorial Universidad del Valle.
- MAVDT. (1997). Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/ley\\_0373\\_060697.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/ley_0373_060697.pdf)
- MAVDT. (2003). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15073>
- MAVDT. (7 de Mayo de 2004). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec\\_1443\\_070504.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_1443_070504.pdf)
- MAVDT. (2004). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13545>
- MAVDT. (18 de Mayo de 2006). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/res\\_0872\\_180506.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_0872_180506.pdf)
- MAVDT. (19 de Abril de 2007). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec\\_1323\\_190407.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_1323_190407.pdf)
- MAVDT. (2007). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec\\_1323\\_190407.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_1323_190407.pdf)
- MAVDT. (2007). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/res\\_2115\\_220707.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_2115_220707.pdf)
- MAVDT. (25 de Octubre de 2010). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- MAVDT. (2010). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>

- MDE. (17 de Noviembre de 2000). MDE. Obtenido de Ministerio de Desarrollo Económico: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38541#0>
- Medina, G. A. (2004). *Geocities*. Obtenido de Hidrología Básica: <http://www.geocities.com/gsilvam/hidrobas.htm>
- Medina, G. A. (29 de Noviembre de 2004). *Geocities*. Obtenido de Hidrología General: <http://www.geocities.com/gsilvam/hidrologia.htm>
- Mena Lopez, G. D., & Montes Garcia, J. O. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona, Departamento de San Salvador*. Proyecto de Grado: San Salvador.
- Mena López, G., & Montes García, J. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona, Departamento de San Salvador*. Universidad del el Salvador. San Salvador: Proyecto de Grado.
- Meneses-Campo, Castro-Rebolledo, & Jaramillo-Londoño. (2019). Comparación de la calidad del agua de dos ríos altoandinos mediante el uso de los índices BWWP/ COL y ABI. *Acta biológica colombiana*, 299-310.
- Mérida, S., & Tores, L. (2009). *Riesgo de contaminación del agua subterránea en el valle de Tulum- provincia de San Juan*. San Juan: Trabajo de Grado.
- Ministerio de Agricultura. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1594\\_de\\_1984.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf)
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial . (6 de Diciembre de 2009). *Ecologito*. Obtenido de Cuencas Hidrograficas: [http://www.aredigital.gov.co/estrategiapartambiental/Documents/Recurso%20H%C3%ADrico/Cuencas\\_Hidrograficas\\_Ecologito.pdf](http://www.aredigital.gov.co/estrategiapartambiental/Documents/Recurso%20H%C3%ADrico/Cuencas_Hidrograficas_Ecologito.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Dirección de agua potable y Saneamiento básico*. Bogotá. Recuperado el Agosto de 2014, de Plan de manejo.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (Noviembre de 2000). *Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Obtenido de Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000: [http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/4.\\_Sistemas\\_de\\_acueducto.pdf](http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/4._Sistemas_de_acueducto.pdf)

- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (22 de Junio de 2007). *Resolución 2115*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n\\_del\\_agua/Resoluci%C3%B3n\\_2115.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf)
- Ministerio de la Protección Social; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. (2007). *Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Resolución número 2115, Bogotá.
- Ministerio De la República. (24 de Diciembre de 1986). *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado*. Obtenido de [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-1986-33757](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1986-33757)
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 del 2017*, disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- Ministerio de Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución 2115 de 2007*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n\\_del\\_agua/Resoluci%C3%B3n\\_2115.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf)
- MMA. (1993). *Ministerio de Medio Ambiente*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley\\_0099\\_221293.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley_0099_221293.pdf)
- MMA. (1993). *Ministerio de Medio Ambiente*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley\\_0099\\_221293.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley_0099_221293.pdf)
- MMADS. (2 de Agosto de 2012). *Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/decreto/dec\\_1640\\_020812.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/decreto/dec_1640_020812.pdf)
- Model, P., Verberk, J., & Van Dijk, J. (2006). *Drinking water - principles and practices*. Singapor: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Mohammadi, A., Yaghmaeian, K., Hossein, F., Nabizadeh, R., Dehghani, M., Khaili, J., & Mahvi, A. (2016). Temporal and spatial variation of chemical parameter concentration in drinking water resources of Bandar-e Gaz City using Geographic Information System. *Desalination and Water Treatment*, 6.
- Monsalve, G. (2006). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Monsalve G, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Santa Fé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Montaño, J., Gagliardi, S., Vidal, H., Montaño, M., & Lucena, R. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Paysandú - comparación de los métodos GOD y DRASTIC. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 35-45.
- MPS & MAVDT. (2 de Junio de 2007). *Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/res\\_2115\\_220707.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_2115_220707.pdf)
- MPS. (9 de Mayo de 2007). *Ministerio de la Protección Social*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec\\_1575\\_090507.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_1575_090507.pdf)
- Muñoz, H. M. (1997). *Obras hidráulicas rurales*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Naciones Unidas Derechos Humanos. (2018). *El derecho al agua*: Folleto informativo No. 35 (p. 10). América del Sur.
- National Geographic. (s.f.). *National Geographic*. Obtenido de La meteorología: <http://www.nationalgeographic.es/ciencia/metereologia>
- Neri A. y Sarcinella M. (2019). *Regional flood frequency analysis with a region of influence approach: Case study of Pescara River Basin*. In *AIP Conference Proceedings*, vol. 2116, no. 1, pp. 210002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5114213>
- Organización Mundial de la Salud. (2008). Guías para la calidad del agua potable. En O. M. Salud. OMS.
- Organización Mundial de la salud. (2017). *2100 millones de personas carecen de agua potable en el hogar y más del doble no disponen de saneamiento seguro*. Ginebra.
- Oswald Spring, Ú. (2003). *El recurso agua en el Alto Balsas*. México.
- Pedraza G, L. F. (Agosto de 2014). *Análisis y evaluación del impacto ambiental de los procesos de urbanización campestre en el sector de la cuenca media- baja del Río Teusacá, municipios de La Calera, Guasca y Sopó*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana.
- Peña, M. S. (11 de Enero de 2012). *Scribd*. Obtenido de Conceptos Básicos sobre el recurso Hídrico : <http://es.scribd.com/doc/77843885/hidrografia-conceptos-basicos>
- Pérez Franco, D. (1995). *La explotación del agua subterránea. Un nuevo comienzo*. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Pérez, G. (2004) *Bocatomas*. [http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/tercera\\_sesion\\_bocatomas.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/tercera_sesion_bocatomas.pdf)

- Pimienta, J. (1980). *La captación de las aguas subterráneas*. Barcelona: Editores técnicos asociados S. A. .
- Pinzón, L. Naranjo, J. Diseño hidráulico de obras civiles para la captación y tratamiento de agua cruda del sistema de acueducto centro poblado la Magdalena municipio de Quebrada Negra, Cundinamarca. Repositorio Universidad Libre. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16443/1/ACUEDUCTO%20%28Proyecto%20de%20grado%29.pdf>
- Planeación, S. d. (2020). POT. Obtenido de Proceso de revisión del Plan de Ordenamiento de Bogotá Documento Diagnóstico: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/tomo\\_6\\_sistema\\_del\\_cuidado\\_i\\_pot\\_2020\\_120520.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/tomo_6_sistema_del_cuidado_i_pot_2020_120520.pdf)
- Prada, G., Castiblanco, G., Guerrero, A., & Espinel, A. (2014). *Estudio de pre factibilidad para el sistema de acueducto complementario de la cabecera municipal de La Vega, Cundinamarca*. Tesis Universidad Militar. Bogotá. [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10837/EspinelOrtizAlfredoAndres2014\\_Capitulo%203.pdf;jsessionid=689537CBEF79BAD09932B23E16960648?sequence=4](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10837/EspinelOrtizAlfredoAndres2014_Capitulo%203.pdf;jsessionid=689537CBEF79BAD09932B23E16960648?sequence=4)
- Premia Llera, J. M., & Fornés Azcoiti, J. M. (2008). *Cambio climático y agua subterránea*. España: Instituto Geográfico y Minero de España. (IGME).
- Presidencia de la República . (2012). *Decreto 1640 de 2012*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49987>
- Presidencia de la República. (1974). *Decreto 2811 de 1974*. Obtenido de <https://www.habitatbogota.gov.co/decreto-2811#:~:text=Descripci%C3%B3n%3A,de%20Protecci%C3%B3n%20al%20Medio%20Ambiente.>
- Presidencia de la República. (10 de Marzo de 1998). Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1327>
- Presidencia de la República. (2015). *Decreto 1076 de 2015*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Price, M. (2003). *Agua subterránea*. México: Grupo Noriega editores.
- Quevedo, C., Orjuela, M. (2016). *Evaluación de la red de acueducto y abastecimiento del municipio de Choachí Cundinamarca desde la captación hasta la planta de potabilización*. Tesis de la Universidad Libre, sede Bogotá. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9513/PROYECTO%20DE%20GRADO%20EVALUACI%C3%93N%20DE%20LA%20RED%20DE%20ACUEDUCTO%20CHOACHI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quintero, K. (2009). *Metodología de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre-factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1287/1/1017128278.pdf>


- Quintero K. B. (2009). *Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Trabajo de grado, Ing. Civil, Univ. Nacional de Colombia. Medellín – Colombia.
- Quintero O., Salichs A., Torres M. (2007). *Gestión Ambiental para una producción más limpia en la Región Centro de Argentina*. Herramientas para aplicación de la producción más limpia. BID y FOMIN. Argentina.
- Rahaman , M., Jahan, C., Arefin, R., & Mazumder, Q. (2017). Morphometric Analysis of Major Watersheds in Barind Tract, Bangladesh: A Remote Sensing and GIS-Based Approach for Water Resource Management . *Hydrology*, 8(6), 86-95.
- Rai, P., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. (2014). *A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India*. *Applied Water Science*, 7(1), 217-232. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). RAS 2000. Bogotá.
- República de Colombia Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (noviembre de 2000). *cra*. Obtenido de reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-200 seccion II titulo B: [http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/4.\\_Sistemas\\_de\\_acueducto.pdf](http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/4._Sistemas_de_acueducto.pdf)
- República de Colombia, Ministerio de Medio Ambiente, Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales , IDEAM. (s.f.). *Estudio nacional del agua* . Obtenido de [http://www.engr.colostate.edu/~neilg/ce\\_old/projects/Colombia/Colombia/cd1\\_files/spanish/12%20ena%20IDEAM%20study.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~neilg/ce_old/projects/Colombia/Colombia/cd1_files/spanish/12%20ena%20IDEAM%20study.pdf)
- Resolución 0330 de 2017. *Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009*.
- Resolución 2115 de 2007. *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencia del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n\\_del\\_agua/Resoluci%C3%B3n\\_2115.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf)
- Rincón Pulgar R. (2004). *Diseño del sistema de abastecimiento para la vereda Anatoli del municipio de La Mesa* (Cundinamarca). Tesis de grado, Tecnólogo en Saneamiento Ambiental, Univ. Francisco José de Caldas, Bogotá D.C – Colombia.
- Ríos Rojas, L., & Vélez Otálvaro, M. V. (2008). *Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del Valle de Cauca, Colombia*. Medellín.

- Rocha, A. (2003) *La bocatoma, estructura clave en un proyecto de aprovechamiento hidráulico*. Revista Ingeniería Civil de la UNI. [imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interés/ROCHA/La\\_bocatoma.PDF](http://imefen.uni.edu.pe/Temas_interés/ROCHA/La_bocatoma.PDF).
- Rodríguez, C. O., Vargas, N. O., Jaramillo, O., Piñeros, A., & Cañas, H. (2010). *Oferta y uso de agua subterránea en Colombia, Cap. 4*. (Vol. Capítulo 4). Estudio nacional del agua, Colombia.
- Rojas Ortiz, E. J., & Serrano Rincon, A. A. (2007). *Importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento de agua potable en Venezuela*. Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Ingeniería Civil, Puerto de la Cruz.
- Romero. F, H. (2005). *Acueductos, teoría y diseño*. Medellín: Lorenza Correo Restrepo.
- Romero. J, A. (1996). *Acuaquímica*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rueda G, O. M., & Batancur V, T. (2006). *Evaluación de la vulnerabilidad del bajo Cauca Antioqueño*. Medellín.
- Sabas R, C. A., & Paredes Cuervo, D. (2009). *Estudio de oferta y demanda hídrica en la cuenca del Río Barbas*. Pereira.
- Sancho. M, V. (s.f.). *contaminación del agua*.
- Santacruz, A., & Villamil, R. (2019). *Estudio del diseño de la PTAP del municipio de Sopo - Cundinamarca y recomendaciones*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23877/1/TESIS%20DE%20GRADO%20PROYECTO%20PTAP%20SOPO%20NOV%202019.pdf>
- Santos García D. (2015). *Propuesta de diseño de la captación, línea de aducción, desarenador y línea conducción del río Mogoticos, para la red alterna del sistema de acueducto de la cabecera municipal de San Gil Santander*. Trabajo de grado. Ing. Civil., Univ. La Gran Colombia, Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Salud (2013). *Figura de riesgo de la calidad del agua para consumo humano sistema Chingaza - PTAP Francisco Wiesner (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá)*.
- Sena Regional Meta; Gobernación del Meta; Corpoica; Corpometa. (Noviembre de 2004). *Plátano su cosecha y poscosecha en la cadena industrial*. Obtenido de Programa nacional de manejo de poscosecha de frutas y hortalizas: [http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca\\_26\\_Platano.pdf](http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_26_Platano.pdf)
- SENA VIRTUAL. (2012). *Conceptos y parámetros básicos de un sistema de riego agrícola (Cálculo del balance hídrico)*. Obtenido de Cálculo de la ETP: [www.senavirtual.edu.co](http://www.senavirtual.edu.co)

- Sener, S., Sener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW- Turkey). *Science of the total environment*, 13.
- SISPRO. (s.f.). *Central Salud Ambiental*. Obtenido de Sistema Integrado de Información de la Protección Social : [https://www.sispro.gov.co/central-salud-ambiental/Pages/Indice-de-Riesgo-de-la-Calidad-del-Agua-para-Consumo-Humano-\(IRCA\)-por-departamento-2016-2017-.aspx#:~:text=%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B,del%20agua%20para%20consumo%20humano](https://www.sispro.gov.co/central-salud-ambiental/Pages/Indice-de-Riesgo-de-la-Calidad-del-Agua-para-Consumo-Humano-(IRCA)-por-departamento-2016-2017-.aspx#:~:text=%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B%E2%80%8B,del%20agua%20para%20consumo%20humano).
- Sociedad Geografica de Lima . (2011). Ciclo Hidrológico . En J. J. Galvez, *Cartilla técnica: Ciclo hidrológico* (págs. 10-14). Lima : Global Water partnership.
- Sopó, C. M. (2000). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Sopó (Cundinamarca)*. Obtenido de [https://sigotvg.igac.gov.co:8090/sigotpot/archivos;/jsessionid=D5576C8BF21EA0382A389A192A1E2B61/SOPO\\_ACUERDO\\_009\\_2000.pdf](https://sigotvg.igac.gov.co:8090/sigotpot/archivos;/jsessionid=D5576C8BF21EA0382A389A192A1E2B61/SOPO_ACUERDO_009_2000.pdf)
- Suárez, A., Agudelo, N., & Forero, J. (2013). Calidad del agua en la quebrada Reyes del municipio de La Vega-Cundinamarca. *Avances*, 10(2).
- Sun, W., Xia, C., Xu, M., Guo, J., & Sun, G. (2016). Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological indicators*, 66, 306-312.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios . (2018). *Evaluación Integral de Prestadores- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Obtenido de [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Acueducto%20y%20Alcantarillado/2018/Dic/evaluacion\\_integral\\_eaab.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Acueducto%20y%20Alcantarillado/2018/Dic/evaluacion_integral_eaab.pdf)
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2005). *Evaluación integral del prestadores empresa de agua de Girardot, Ricaurte y la región S.A. E.S.P.* <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Acueducto%2C%20alcantarillado%20y%20aseo/Acueducto%20y%20Alcantarillado/2018/Dic/2015evaluacionintegraldeprestadoresempresadeaguasdegirardotricaurteylaregions.a.e.s.p.pdf>
- Tambo López S. (2015). *Propuesta de un índice de calidad del agua como herramienta de gestión para los humedales capitalinos*. Trabajo de pregrado. Ing. Ambiental, Univ. Santo Tomás, Bogotá D.C – Colombia.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra* (8 ed.). Madrid: Pearson Educación S.A.
- Toro, C. G. (Octubre de 2011). *Academic*. Obtenido de Monitoreo de la calidad de agua- Oxígeno disuelto: <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-861/maguaoxigenodisuelto.pdf>



- Torres, P., Cruz, C., Patiño, P., Escobar, J., & Pérez, A. (2010). Aplicación de los índices de calidad de agua ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 86-95.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati, Oh: National Risk Management Research Laboratory.
- UNESCO. (1992). *Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos (WWAP)*. Naciones Unidas.
- Unicef. (2014). *El ambiente sano en los planes de desarrollo*. Bogotá D.C: Unicef. Recuperado el 11 de 03 de 2014, de El saneamiento y el ambiente sano: <http://www.unicef.com.co/situacion-de-la-infancia/el-agua-potable/>
- Universidad nacional de colombia sede manizales. (s.f.). Captacion de aguas superficiales. *Captacion de fondo* . Manizales.
- Valdés De Hoyos, E., y Uribe Arzate, E. (2016). *El derecho humano al agua. Una cuestión de interpretación o de reconocimiento*. Cuestiones Constitucionales, 34, 3-25. DOI: 10.1016/j.rmhc.2016.07.001
- Vargas L., Torres D. y Carrillo S. (2019) “Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander”, *Respuestas*, vol. 24, no. 1, pp. 6 - 13, 2019. doi:[10.22463/0122820X.1323](https://doi.org/10.22463/0122820X.1323)
- Vargas J. (2006). *Diseño de un programa de producción más limpia para su implementación en la industria cervecera Bavaria S.A. Bucaramanga Facultad*. Trabajo de grado. Ing Amb., Univ. de la Salle. Bogotá.
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas* (Segunda ed.). Medellín.
- Vélez Otálvaro, M. V. (2004). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*. Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulicos , Medellín .
- Villasante, A. L. (2000). *El riego. Fundamentos hidraulicos* (3a edición ed.). Madrid. Barcelona. Mexico: Ediciones Mundi-Prensa.
- Villón Béjar, M. (2006). *Drenaje*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- World Bank. (2019). *Quality unknown: The invisible water crisis*. Washington.
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y., & Deng, J. (2018). Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 914-922.
- Zumaeta, M. A. (2004). Determinación de la turbiedad. Método nefelométrico- . En M. A. Zumaeta, *Manual para analisis basicos de calidad del agua de bebida* (págs. 96-99). Lima: Centro paramericano de ingeniería sanitaria u ciencias de ambiente.



## Gestión integral de los recursos hídricos en abastecimiento y calidad del agua

Se terminó de producir en febrero de 2022.

Las fuentes tipográficas empleadas son Source Sans Pro Light en 11 puntos, en texto corrido  
y Source Sans Pro Light en 18 y 11 puntos en títulos.

## COAUTORES

Cristina Alejandra Herrera Quevedo  
*Ingeniera ambiental egresada de la  
Universidad Libre*

María Camila Poveda Orjuela  
*Ingeniera ambiental egresada de la  
Universidad Libre*

José Nicolás Ortiz Rubiano  
*Ingeniero ambiental egresado de la  
Universidad Central*

Natalia Andrea Hernández Núñez  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Vanessa Ahudrey Joya Flórez  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Paula Alejandra Pérez Gómez  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Dania Xileth Gutiérrez Valderrama  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Laura Vanessa Lotero Zapata  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Liseth Vanesa Angarita García  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*

Karen Tatiana Quiroga Camargo  
*Estudiante de Ingeniería Ambiental e  
integrante del semillero de investigación  
Tecnoambiental*



En este libro se aborda el tema de recursos naturales con énfasis en abastecimiento y calidad del agua como herramienta de gestión integral del recurso hídrico, en los temas de abastecimiento y calidad hídrica e investigación de evaluación hidráulica e hidrológica de acueductos.

Este estudio, de autoría del ingeniero Jesús Ernesto Torres Quintero (Q.E.P.D.) , contó con el apoyo de estudiantes, auxiliares de investigación pertenecientes al semillero de investigación Tecnoambiental e ingenieras ambientales egresadas de la Universidad Libre, dentro de la línea de investigación de recursos naturales y gestión ambiental, en el marco del proyecto de investigación sobre gestión integral de recursos hídricos.



ISBN 958-978-5578-90-6



9 789585 578906