

**Maestría en Ingeniería Civil**

**EVALUACION DE DIAMETROS MINIMOS PARA CONDUCCIONES  
Y REDES DE DISTRIBUCION EN POBLACIONES CON NIVEL DE  
COMPLEJIDAD BAJO Y MEDIO – RAS 2000**

**Fabio Ramírez Suárez**

**Bogotá, D.C., junio de 2016**



**EVALUACION DE DIAMETROS MINIMOS PARA CONDUCCIONES  
Y REDES DE DISTRIBUCION EN POBLACIONES CON NIVEL DE  
COMPLEJIDAD BAJO Y MEDIO – RAS 2000**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Héctor Alfonso Rodríguez Díaz**

**Director**

**Bogotá, D.C., junio de 2016**



La tesis de maestría titulada “EVALUACION DE DIAMETROS MINIMOS PARA CONDUCCIONES Y REDES DE DISTRIBUCION EN POBLACIONES CON NIVEL DE COMPLEJIDAD BAJO Y MEDIO – RAS 2000”, presentada por Fabio Ramírez Suárez cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente..

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

German Ricardo Santos Granados

---

Jurado

Jairo Alberto Romero Rojas

---

Bogotá, D.C., julio de 2016

## RESUMEN

En este trabajo de grado se hace un estudio de las redes de distribución de los sistemas de acueducto en poblaciones con niveles de complejidad medio y bajo para ver la posibilidad de reducir los diámetros exigidos por la norma.

Durante las pruebas realizadas a varios diseños de sistemas de alcantarillado se observó que en muchos casos los diámetros mínimos exigidos resultaban sobredimensionados para el caudal requerido, razón por la cual algunos parámetros hidráulicos no cumplían con la normatividad vigente. Esto motivó la necesidad de ensayar con diámetros menores a los exigidos para transportar ese caudal sin que los parámetros hidráulicos superaran los límites máximos y mínimos establecidos.

Inicialmente se investigó la evolución de la normatividad en cuanto a diámetros y parámetros hidráulicos para estudiar la posibilidad de disminuirlos. Para completar el análisis se hizo mención de la hidráulica de la tubería y se enunciaron los parámetros técnicos y legales que inciden en el diseño de los sistemas de acueducto, incluidos en la normatividad vigente.

Con base en lo anterior, se escogieron poblaciones con un nivel de complejidad bajo y medio para hacer las modelaciones, tanto con el diámetro mínimo exigido como con el optimizado. Posteriormente se analizaron y compararon los resultados técnicos, hidráulicos y económicos.

La reducción de los diámetros representó una gran mejoría en la velocidad y la presión; así mismo, hubo una disminución económica de más del 20% con respecto a los diámetros mínimos establecidos en la norma.

Finalmente, con estos resultados se plantean las conclusiones y recomendaciones sobre la posibilidad de reducir la sección de diámetro mínimo exigido en la normatividad vigente, pero le corresponde al ingeniero diseñador hacer las justificaciones y sustentos necesarios para tal fin.

## ABSTRACT

In this paper grade a study of the distribution networks of water systems in towns with medium levels of complexity and low to see the possibility of reducing the diameters required by the standard is made.

During the testing of various designs of sewerage systems it was observed that in many cases proved the minimum diameters required for the required flow oversized, why some hydraulic parameters did not meet current regulations. This motivated the need to test lower than those required to carry this flow without hydraulic parameters exceed the maximum and minimum diameters limits.

Initially the evolution of regulations regarding diameters and hydraulic parameters were investigated to study the possibility of diminishing. To complete the analysis made mention of hydraulic pipe and the technical and legal parameters that affect the design of water systems included in the current regulations were stated.

Based on the above, people with a low level of complexity and a half were chosen to do the modeling, both the minimum diameter required as optimized. They were then analyzed and compared the technical, hydraulic and economic results.

Reducing the diameters represented a great improvement in speed and pressure; likewise, there was an economic decline of more than 20% over the minimum set in the standard diameters.

Finally, these results conclusions and recommendations on the possibility of reducing the minimum diameter section required by current regulations arise, but it is up to the designer engineer make justifications and livelihoods necessary for this purpose.

Contenido	
<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	9
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	10
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	15
<b>2. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA CONVENCIONAL DE ACUEDUCTO</b> .....	19
2.1 Aspectos generales.....	19
2.2 Fuente de suministro.....	19
2.3 Estructuras de captación.....	19
2.4 Estructuras de conducción.....	21
2.5 Sistema de tratamiento.....	22
2.6 Almacenamiento.....	26
2.7 Distribución.....	27
2.8 Conexiones domiciliarias.....	27
<b>3. CONCEPTOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE LA CONDUCCIÓN Y LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN</b> .....	29
3.1 Conducción.....	29
3.1.1 Aspectos generales.....	29
3.1.2 Hidráulica de la conducción.....	31
3.1.3 Pérdidas menores.....	35
3.2 Redes de distribución.....	36
3.2.1 Aspectos generales.....	36
3.2.2 Hidráulica de las redes de distribución.....	36
<b>4. MARCO LEGAL PARA EL DISEÑO DE ACUEDUCTOS</b> .....	38
4.1 Generalidades.....	38
4.2 Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000.....	38

4.2.1	Título A. Nivel de complejidad del sistema.....	39
4.3	Resolución 2320 de 27 noviembre de 2009.....	43
4.4	Título B. Sistemas de acueducto.....	43
4.4.1	Caudal de diseño.....	44
4.4.2	Proyección de los usuarios .....	45
4.4.3	Dotación neta .....	46
4.4.4	Pérdidas en el sistema de acueducto .....	47
4.4.5	Dotación bruta.....	48
4.4.6	Demanda de agua .....	48
4.5	Parámetros de conducción .....	49
4.5.1	Caudal de diseño.....	49
4.5.2	Diámetro mínimo .....	49
4.5.3	Velocidades .....	49
4.6	Parámetros redes de distribución .....	49
4.6.1	Caudal de diseño.....	49
4.6.2	Presión en la red de distribución.....	49
4.6.3	Diámetros mínimos .....	50
4.6.4	Velocidades .....	50
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>51</b>
5.1	Costo-eficiencia .....	51
5.2	Costo mínimo de expansiones de capacidad .....	51
<b>6.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS MUNICIPIOS DE NIVEL DE COMPLEJIDAD BAJO Y MEDIO.....</b>	<b>56</b>
6.1	Antioquia .....	61
6.2	Boyacá .....	61
6.3	Cundinamarca.....	61
6.4	Nariño.....	61
<b>7.</b>	<b>ESTUDIOS DE CASO .....</b>	<b>63</b>
7.1	Aspectos generales.....	63
7.1.1	Análisis de la población .....	63
7.1.2	Nivel de complejidad del sistema.....	64
7.1.3	Caudal de diseño.....	64

7.1.4	Análisis de precios.....	64
7.2	Poblaciones que se estudiaron. Estudio de casos.....	65
7.2.1	San José del Palmar .....	65
7.2.2.	Pachavita .....	82
7.2.3.	Turmequé.....	94
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		115
<b>ANEXOS</b> .....		117
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		118

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Bocatoma de fondo, acueducto San José del Palmar (Chocó).....	20
Ilustración 2 Bocatoma flotante, acueducto El Banco (Magdalena).....	20
Ilustración 3 Estructura de captación profunda, acueducto de Sopó (Cundinamarca). ....	21
Ilustración 4 Tendido de una conducción, acueducto San José del Palmar (Chocó). ....	22
Ilustración 5 Bandeja de aireación. PTAP Sopó (Cundinamarca).....	23
Ilustración 6 Mezcla rápida. PTAP Sopó (Cundinamarca). ....	24
Ilustración 7 Floculación de flujo vertical. PTAP Sopó (Cundinamarca). ....	24
Ilustración 8 Sedimentación tasa acelerada. PTAP Sopó (Cundinamarca).....	25
Ilustración 9 Filtración rápida. PTAP Sopó (Cundinamarca).....	25
Ilustración 10 Cloración. PTAP Sopó (Cundinamarca). Se observa el sistema de bombeo. .....	26
Ilustración 11 Tanque de almacenamiento semienterrado, acueducto San José del Palmar (Chocó). ....	26
Ilustración 12 Tanque de almacenamiento elevado, acueducto de Sampués (Sucre). ....	27
Ilustración 13 Tendido de una red de distribución y conexión domiciliaria, acueducto San José del Palmar (Chocó).....	28
Ilustración 14 Mapa de categorización de los municipios del departamento de Boyacá....	41
Ilustración 15 Mapa de categorización de los municipios del departamento de Cundinamarca.....	42
Ilustración 16 Ubicación de San José del Palmar en el departamento de Chocó. ....	66
Ilustración 17 Esquema de la conducción.....	69
Ilustración 18 Esquema de la red de distribución.....	70
Ilustración 19 Ubicación de Pachavita, en el departamento de Boyacá.....	83
Ilustración 20 Conducción tanque red - red de distribución, municipio de Pachavita .....	87
Ilustración 21 Ubicación de Turmequé en el departamento de Boyacá. ....	95
Ilustración 22. Conducción tanque red - red de distribución, municipio de Turmequé.....	98

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores típicos del coeficiente C.....	34
Tabla 2 Valores típicos del coeficiente k de pérdidas menores.....	35
Tabla 3 Nivel de complejidad del sistema .....	40
Tabla 4 Categorización de los municipios.....	40
Tabla 5 Periodo de diseño para los sistemas de acueducto y alcantarillado .....	43
Tabla 6 Contenido del Título B del RAS 2000.....	43
Tabla 7 Métodos de cálculo para la proyección de la población .....	45
Tabla 8 Dotación neta por habitante .....	46
Tabla 9 Consumo neto comercial .....	46
Tabla 10 Consumo neto industrial.....	46
Tabla 11 Consumo neto por tipo de industria.....	46
Tabla 12 Consumo neto fines públicos.....	47
Tabla 13 Consumo neto escolar .....	47
Tabla 14 Consumo neto institucional.....	47
Tabla 15 Consumo neto hoteles.....	47
Tabla 16 Caudal diseño de la conducción.....	49
Tabla 17 Presiones máximas y mínimas en la red de distribución.....	50
Tabla 18 Diámetros mínimos en red matriz .....	50
Tabla 19 Diámetros mínimos en redes secundarias.....	50
Tabla 20 Velocidades máximas permisibles en la red .....	50
Tabla 21 Proyección población, localidad de 2.500 habitantes .....	53
Tabla 22 Proyección de demanda de agua.....	54
Tabla 23 Nivel de complejidad con los rangos de población al año de diseño .....	57
Tabla 24 Inversión en sistemas de acueducto, discriminada por componentes en miles de pesos .....	62
Tabla 25 Análisis de precios de tubería PVC acueducto.....	64
Tabla 26 Población censada y población actual <sup>S</sup> San José del Palmar .....	67
Tabla 27 Proyección de población para San José del Palmar.....	67
Tabla 28 Caudales de diseño para periodos de cinco años.....	69
Tabla 29 Datos de entrada – Nudos. ....	72
Tabla 30 Datos de entrada - Tuberías. ....	73
Tabla 31 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado .....	75
Tabla 32 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado. ....	77
Tabla 33 Comparación de resultados diámetro optimizado vs diámetro RAS. ....	79
Tabla 34 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con norma RAS. ....	82

Tabla 35 Población censada y población actual (Pachavita).....	84
Tabla 36 Proyección de población para el municipio de Pachavita. ....	84
Tabla 37 Caudales de diseño en periodos de cinco años .....	85
Tabla 38 Datos de entrada – Nudos.....	88
Tabla 39 Datos de entrada – Tuberías .....	89
Tabla 40 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado. ....	90
Tabla 41 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado .....	91
Tabla 42 Comparación de resultados: diámetro optimizado vs. diámetro RAS. ....	92
Tabla 43 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con diámetros de la norma RAS.....	93
Tabla 44 Población censada y población actual . Turmequé.....	96
Tabla 45 Proyección de poblaciones. Turmequé.....	96
Tabla 46 Caudales de diseño en periodos de cinco años .....	97
Tabla 47 Datos de entrada – Nudos.....	101
Tabla 48 Datos de entrada – Tuberías .....	103
Tabla 49 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado. ....	106
Tabla 50 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado. ....	108
Tabla 51 Comparación de resultados diámetro optimizado vs diámetro RAS. ....	111
Tabla 52 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con norma RAS. ....	114

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 . Distribución de los municipios por categoría, vigencia 2015 .....	56
Gráfico 2 Distribución de los municipios de categoría 6, según población vigencia 2015 .	58
Gráfico 3 Distribución de los municipios categoría 6 por departamentos .....	59
Gráfico 4 Índice de riesgo de calidad de agua para los municipios de nivel de complejidad bajo y medio. ....	60
Gráfico 5 . Población actual y futura de San José del Palmar .....	68
Gráfico 6 Población actual y futura (Pachavita). ....	85
Gráfico 7 Población actual y futura. Turmequé .....	97

## INTRODUCCIÓN

En Colombia las inversiones en infraestructura se han caracterizado por ser lo más económicas posible. De tal suerte que la solicitud de recursos para un proyecto de acueducto para el sector urbano o su viabilización, ya sea a través del Plan Departamental de Aguas o por la Ventanilla Única del Ministerio de Vivienda, debe estar acompañada de un análisis técnico-económico para cada componente del sistema y la alternativa escogida debe ser la más económica, de acuerdo con los requisitos definidos por el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000.

Lo cual ha significado para el sector de agua potable y saneamiento básico que muchos proyectos utilicen buena parte de la estructura existente, integrándola de manera activa al nuevo proyecto, a pesar de lo que señalan las políticas agresivas del Plan de Agua para la Prosperidad del gobierno nacional.

La baja asignación de recursos para proyectos de infraestructura y los múltiples y estrictos requisitos por parte de las entidades encargadas de su aprobación impide que se puedan construir en una sola fase, obligando a adiciones por parte de los ejecutores e, incluso, a que en muchas ocasiones algunos proyectos queden incompletos.

Por lo anterior, este trabajo de grado realiza un estudio considerando diámetros menores (existentes en el mercado), tanto en las conducciones, cuando éstas trabajan a presión, como en las redes de distribución, pues en poblaciones con un nivel de complejidad bajo, es decir, con menos de 2.500 habitantes al final del periodo de diseño, y con un nivel de complejidad medio, menos de 12.500 habitantes al final del periodo de diseño, los diámetros que actualmente permite la normatividad resultan sobredimensionados, lo cual aumenta considerablemente el costo del proyecto, y en el caso particular de los sistemas de acueducto, es posible mejorar los presupuestos de construcción y tener un mayor alcance en la ejecución.

El proyecto que se describe en este documento consiste en el estudio de varias poblaciones colombianas pertenecientes a los niveles de complejidad medio y bajo, de las cuales se cuenta con información topográfica, demográfica y socioeconómica, que permite realizar un análisis hidráulico en el que se varían los diámetros de conducción y distribución de acueducto, verificando los parámetros técnicos que deben cumplir y comparándolos con los diámetros mínimos exigidos por la legislación, para definir una solución con base en los costos de la red.

## OBJETIVOS

### General.

Mediante diferentes criterios hidráulicos, normativos, geométricos y económicos, analizar casos reales de sistemas de acueductos de poblaciones colombianas con el fin de evaluar la posible reducción de los diámetros mínimos en los diferentes sistemas de conducción, redes matrices y redes de distribución.

### Específicos

- Evaluar los parámetros hidráulicos y económicos que se deben considerar para establecer el dimensionamiento de las conducciones y redes de distribución.
- Realizar el análisis económico comparativo de los diseños resultantes de la reducción del diámetro con los diámetros de la norma RAS 2000.
- Proponer parámetros a tener en cuenta para la reducción de diámetros en conducciones y redes.

## 1. ANTECEDENTES

Durante muchos años la entidad encargada de la ejecución de las políticas del gobierno nacional en lo referente a los servicios de acueducto y alcantarillado fue el Instituto Nacional de Fomento Municipal, Insfopal, que a través de su junta directiva aprobó en 1977 las “Guías para presentación, diagnóstico y diseño de sistemas de acueducto”, en las que se resumieron las normas mínimas para el análisis técnico, económico y financiero de las diferentes alternativas para el estudio de los proyectos de sistemas de acueducto<sup>1</sup>.

A continuación se hace una revisión de los capítulos más relevantes de estas guías, con el fin de analizar los parámetros de diseño que son susceptibles de modificación para elaborar proyectos viables y económicos.

El capítulo V, Especificaciones generales para el diseño de sistemas de acueducto, contiene los parámetros de diseño generales. Específicamente el numeral 5.9.1.2, Conducciones a presión, establece las condiciones hidráulicas que se deben cumplir para el cálculo de los conductos a presión. Entre las más relevantes tenemos las siguientes:

Fórmula de cálculo: Hazen - Williams.

Velocidad mínima: 0,45 m/s

Velocidad máxima: relaciona una tabla donde para PVC es de 4,5 m/s

Por otra parte, el capítulo IX, Conducción, contiene los criterios para este componente; sin embargo, para los parámetros hidráulicos hace referencia al capítulo V. Para la conducción, las condiciones no se limitan al diámetro mínimo sino al cumplimiento de la velocidad mínima.

Los parámetros que se deben seguir en el diseño de las redes de distribución están establecidos en el capítulo XI, Distribución. Para el presente estudio se destacan los siguientes:

Fórmula de cálculo: Hazen - Williams

Método de cálculo: Hardy Cross u otro similar, con cierre menor o igual a 1 m.

Velocidad mínima. 0,45 m/s.

Velocidad máxima: 3 m/s para poblaciones con topografía quebrada, para zonas planas según el diámetro, con rangos entre 0,80 y 2,80 m/s, como se indica en una tabla.

Diámetro mínimo: 3” o 75 mm, con justificación y aprobación se aceptan 2” o 50 mm, pero sólo para las tuberías secundarias.

Presión mínima: 10 m.

---

<sup>1</sup> Insfopal (1977). Guías para presentación, diagnóstico y diseño de sistemas de acueducto.

Presión máxima: 50 m.

Como se observa, las guías contemplaban el criterio del diámetro mínimo para las redes de distribución, acompañado de las velocidades mínima y máxima, y de un rango de presión establecido.

Una década después de aprobadas las “Guías para presentación, diagnóstico y diseño de sistemas de acueducto”, la Presidencia de la República ordenó la liquidación del Insfopal, estableciendo como límite el 31 de diciembre de 1989 para su finalización<sup>2</sup>.

Si bien se ordenó esa liquidación, ninguna normativa señaló en su momento que los criterios técnicos de las guías hubieran cambiado, de tal forma que los diseños de los proyectos de acueducto siguieron ciñéndose a dichos criterios. No obstante, estas guías no hacían parte de una legislación bien definida, razón por la cual muchos consultores y entes municipales no las concebían de obligatorio cumplimiento.

Por esta razón, el Ministerio de Desarrollo Económico expidió en 1998 la resolución 822 del 6 de agosto, “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 98”<sup>3</sup>.

En este reglamento, lo que tiene que ver con el sistema de acueducto está definido en el Título B, capítulos B.6, Aducción y conducción, y B.7, Redes de distribución, que establecen los parámetros hidráulicos que se deben seguir. A continuación se relacionan los más relevantes para conductos a presión:

- Conducciones

Fórmula de cálculo: Darcy - Weisbach junto con la de Colebrook - White. Acepta la de Hazen - Williams para sus rangos de validez.

Diámetro mínimo conducción: 2” o 50 mm.

Velocidad mínima: 0,60 m/s.

Velocidad máxima 6,00 m/s.

- Redes de distribución

Fórmula de cálculo: Darcy - Weisbach junto con la de Colebrook - White. Acepta la de Hazen - Williams para sus rangos de validez.

Método de cálculo: Teoría lineal o de gradiente (Cross), cierre menor a 0,10 m.

Diámetro mínimo: nivel de complejidad bajo, red matriz 2,5”, red secundaria 1,5”

Nivel de complejidad medio, red matriz 4”, red secundaria 2”.

Presión mínima: nivel de complejidad bajo 10 m, medio 15 m.

Presión máxima: 50 m.

El RAS 98 permite el uso de programas de computador para el cálculo de las redes. No obstante, no define valores máximos o mínimos para la velocidad, con lo que el criterio que se debe cumplir es el del diámetro mínimo junto con un rango de presión establecido en la red.

---

<sup>2</sup> Decreto 77 del 15 de enero de 1987. Consulta realizada en la página <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3455>.

<sup>3</sup> La resolución se consultó en la página <https://www.redjurista.com/documents/r1082298.aspx>.

A diferencia de las normas del Insfopal, en el RAS 98 algunos parámetros de diseño dependen del nivel de complejidad del sistema, que como se explicará más adelante está definido por el número de habitantes de la población.

Posteriormente, el Ministerio de Desarrollo Económico expidió la Resolución 1096 del 17 de noviembre del 2000, "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS"<sup>4</sup>, que se conoce como el RAS 2000.

Al igual que en el RAS 98, el RAS 2000, en el Título B, Sistemas de acueducto, contiene los lineamientos que se deben seguir para el diseño de sistemas de acueducto. Los parámetros más relevantes no sufrieron variaciones significativas respecto a los señalados en el reglamento de 1998.

Sin embargo, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, expidió en el 2012 un nuevo Título B<sup>5</sup>, en el cual establece, entre otros, los siguientes parámetros:

- Conducciones

Fórmula de cálculo: Darcy - Weisbach junto con la de Colebrook - White. Acepta la de Hazen - Williams para sus rangos de validez.

Diámetro mínimo conducción: 3" o 75 mm.

Velocidad mínima: 0,50 m/s

Velocidad máxima 6,00 m/s.

- Redes de distribución

Fórmula de cálculo: Darcy - Weisbach junto con la de Colebrook - White. Acepta la de Hazen - Williams para sus rangos de validez.

Método de cálculo: balance de masa en los nodos y conservación de energía en los circuitos.

Método de gradiente: se debe realizar en programas de modelación de redes.

Diámetro mínimo: niveles de complejidad bajo y medio, red matriz 100 mm, red secundaria 50 mm

Presión mínima: niveles de complejidad bajo y medio, 10 m.

Presión máxima: 50 m.

Velocidad mínima: 0.5 m/s.

Velocidad máxima: se estipula en la tabla B.7.6, para PVC 6,0 m/s.

El nuevo Título B adiciona el criterio de las velocidades máxima y mínima para la red de distribución, así como un análisis pormenorizado en la modelación hidráulica que debe incluir simulaciones para diferentes periodos de tiempo y condiciones de operación.

Cabe mencionar que la estructura que se planteó en 1977 en la guías del Insfopal se conserva en el RAS 2000, excepto los modelos de cálculo producto de la evolución de los programas de computador.

---

<sup>4</sup> La resolución se consultó en la página <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38541>.

<sup>5</sup> El título B se consultó en la <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-agua/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable>

El análisis de este estudio se hará según lo establecido en Título B, expedido en el año 2012, el cual sigue vigente.

## **2. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA CONVENCIONAL DE ACUEDUCTO**

### **2.1 Aspectos generales**

Este capítulo no pretende extenderse en la definición de un sistema de acueducto ni de cada uno de sus componentes, pues las referencias respectivas se encuentran en los textos de acueductos y alcantarillados que incluyen una definición explicativa y detallada sobre el tema; sin embargo, para el desarrollo del presente estudio es importante definir el sistema así como sus principales componentes.

Un sistema convencional de acueducto es aquel que capta, trata, transporta y distribuye agua potable hasta el usuario final, en una población determinada, en condiciones óptimas para su consumo.

En términos generales, este sistema se compone de una fuente de suministro, obras de captación, sistemas de aducción y conducción, sistema de tratamiento de agua, almacenamiento, distribución y entrega al usuario final mediante la conexión domiciliaria. A continuación se describe cada uno de estos componentes.

### **2.2 Fuente de suministro**

La fuente de suministro o de abastecimiento es un manantial de agua natural, que puede ser superficial o subterráneo, y estas pueden ser ríos, lagos, quebradas y, en algunos casos, el mar, como sucede en la isla de San Andrés.

Las fuentes subterráneas generalmente son acuíferos cuya profundidad depende de su ubicación.

La elección de una fuente depende de factores como su localización, su calidad y su cantidad, según la población que se vaya a abastecer.

### **2.3 Estructuras de captación**

Son las estructuras encargadas de tomar el agua. Dependiendo del tipo de fuente seleccionada pueden ser superficiales, denominadas bocatomas, o subterráneas, llamadas pozos profundos.

Las obras de captación superficiales pueden ser de tipo lateral, de fondo o flotante, dependiendo de la fisionomía que tenga el río, la quebrada o el lago del cual se pretende hacer el abastecimiento.



*Ilustración 1 Bocatoma de fondo, acueducto San José del Palmar (Chocó)  
Fuente: autor.*



*Ilustración 2 Bocatoma flotante, acueducto El Banco (Magdalena).  
Fuente: autor.*

Cuando la fuente es profunda, generalmente la toma se realiza mediante una bomba de tipo lapicero, que se encarga de impulsar el agua hacia una estructura determinada.



*Ilustración 3 Estructura de captación profunda, acueducto de Sopó (Cundinamarca).  
Fuente: autor.*

#### 2.4 Estructuras de conducción

Son las obras encargadas de llevar el agua de una estructura a otra; por ejemplo, de la bocatoma al desarenador o del desarenador a un tanque de almacenamiento. Cuando transportan agua cruda, es decir, como sale de la fuente, el proceso se denomina de aducción.

Dependiendo el tipo de traslado de agua, a presión o a gravedad, estas estructuras tienen diferente forma, y pueden estar conformadas por tuberías o canales, ya sea rectangulares o trapezoidales. En el caso de tubería pueden ser a presión o a flujo libre.



*Ilustración 4 Tendido de una conducción, acueducto San José del Palmar (Chocó).  
Fuente: autor.*

## 2.5 Sistema de tratamiento

En esta estructura se realizan diversos procesos para lograr que el agua cruda sea apta para el consumo humano., ya que las características de las fuentes de suministro no garantizan un ciento por ciento de agua potable.

En términos generales, un sistema de tratamiento se compone de lo siguiente:

- Mezcla rápida (por ejemplo: un resalto hidráulico)
- Floculación (por ejemplo: un sistema hidráulico o mecánico)
- Sedimentador (generalmente son de alta tasa de sedimentación)
- Filtración (usualmente de arena, grava y antracita)
- Cloración (sistema de desinfección, como el cloro gaseoso)

Existen otros procesos adicionales que se conocen comúnmente como pretratamientos y dependen de la calidad del agua en la fuente. Por ejemplo, la torre de aireación, que se utiliza en las aguas de pozo para remover hierro u olores, o el ablandamiento con cal, que se emplea cuando la dureza del agua supera los valores permisibles.

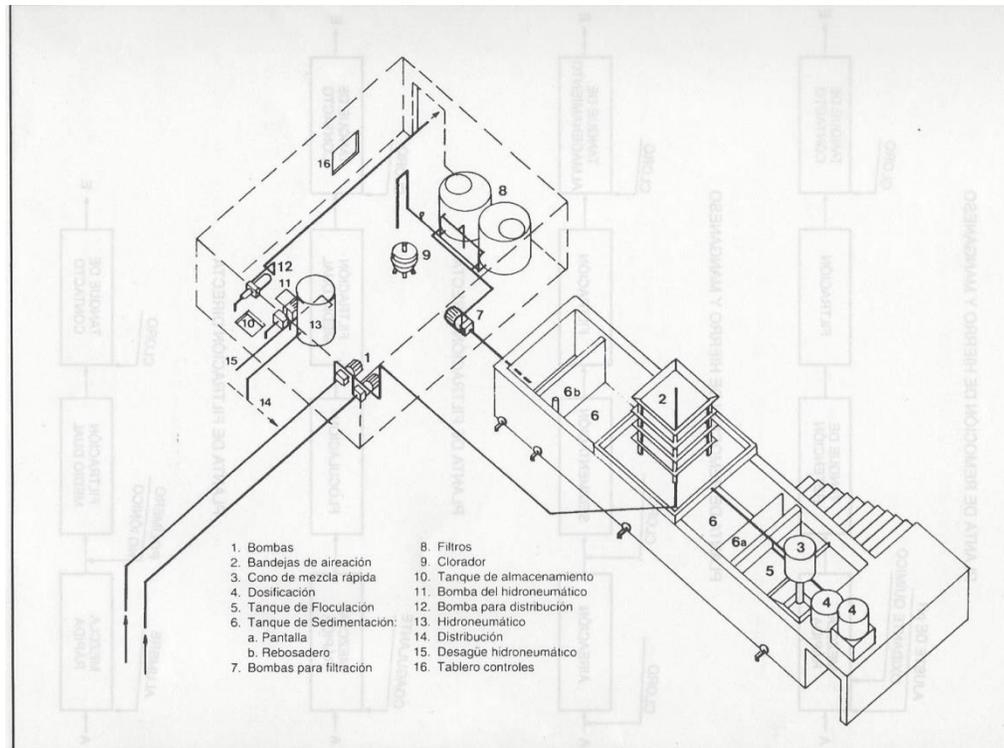


Figura 1. Esquema de un sistema de tratamiento convencional con torre de aireación<sup>6</sup>.



Ilustración 5 Bandeja de aireación. PTAP Sopó (Cundinamarca).  
 Fuente: autor.

<sup>6</sup> Romero, J. (1996). *Acuipurificación*, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.



*Ilustración 6 Mezcla rápida. PTAP Sopó (Cundinamarca).  
Fuente: autor.*



*Ilustración 7 Floculación de flujo vertical. PTAP Sopó (Cundinamarca).  
Fuente: autor.*



*Ilustración 8 Sedimentación tasa acelerada. PTAP Sopó (Cundinamarca).  
Fuente: autor.*



*Ilustración 9 Filtración rápida. PTAP Sopó (Cundinamarca).  
Fuente: autor.*



*Ilustración 10 Cloración. PTAP Sopó (Cundinamarca). Se observa el sistema de bombeo.  
Fuente: autor.*

## 2.6 Almacenamiento

Estas estructuras se conocen generalmente como tanques y tienen diversas formas geométricas. Se construyen enterrados, semienterrados o elevados, dependiendo de las características topográficas de la población.

Estos tanques son necesarios para abastecer de agua a la población durante un periodo determinado, debido a que no siempre es posible mantener constante el caudal de abastecimiento, o en caso de labores de reparación o mantenimiento. Dependiendo de su función u operación en el sistema, éstos pueden ser de compensación o de reserva.



*Ilustración 11 Tanque de almacenamiento semienterrado, acueducto San José del Palmar (Chocó).  
Fuente: autor.*



*Ilustración 12 Tanque de almacenamiento elevado, acueducto de Sampués (Sucre).  
Fuente: autor*

## 2.7 Distribución

La distribución se realiza a través de un conjunto de tuberías dispuestas en forma de redes, abiertas o cerradas, a lo largo de toda la población para hacer la entrega final del agua a cada domicilio.

Según el tamaño de la población y su distribución puede haber redes principales o matrices y redes secundarias.

La llegada a cada usuario se realiza generalmente a través de las redes secundarias.

## 2.8 Conexiones domiciliarias

Son estructuras que se derivan de las redes secundarias de distribución para llegar al usuario final. En éstas se ubica el medidor, que se encarga de contabilizar el agua que se consume.



*Ilustración 13 Tendido de una red de distribución y conexión domiciliaria, acueducto San José del Palmar (Chocó).  
Fuente: autor.*

### 3. CONCEPTOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE LA CONDUCCIÓN Y LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

#### 3.1 Conducción

##### 3.1.1 Aspectos generales

Una vez presentados los principales componentes de un sistema de acueducto es necesario abordar lo referente a las conducciones a presión, que son el objeto del presente estudio.

El trazado de la conducción depende de la topografía de la zona, tanto en el sentido vertical como en el longitudinal. Según el perfil topográfico y teniendo en cuenta la localización de la tubería respecto de la línea piezométrica se presentan las siguientes situaciones: a) tubería por debajo de la línea piezométrica, b) tubería que cruza la línea piezométrica pero está por debajo del plano piezométrico estático y c) tubería que cruza por encima de la línea piezométrica y del plano piezométrico estático, como se muestra en las figuras 1, 2 y 3<sup>7</sup>.

En el primer caso (figura 1) se considera una conducción a presión forzada y se deben colocar sistemas de purga en los puntos bajos y válvulas ventosas en los puntos altos, los cuales evacúan el aire de la tubería.

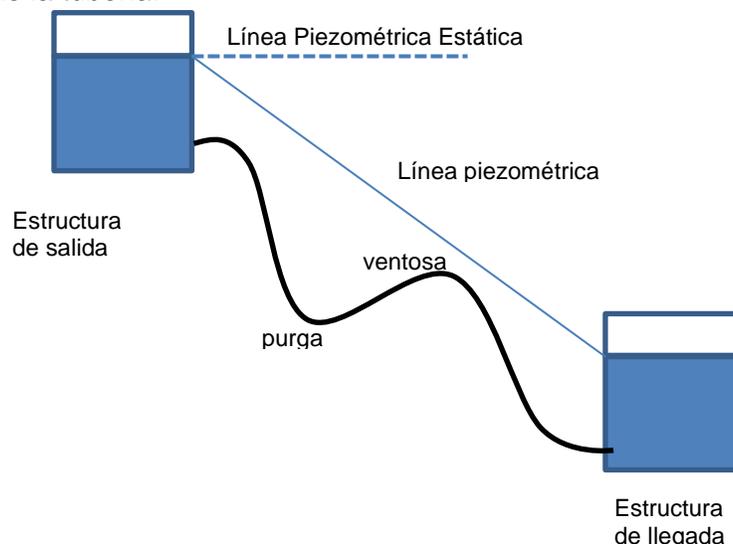


Figura 2. Tubería debajo de la línea piezométrica.

<sup>7</sup> López, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Cuando la tubería cruza la línea piezométrica pero está debajo de la línea piezométrica estática (figura 2), entre los puntos A y B, se presentan presiones negativas. La ventosa en el punto más alto, ubicado en el segmento AB, no funciona debido a que la presión es menor que la presión atmosférica.

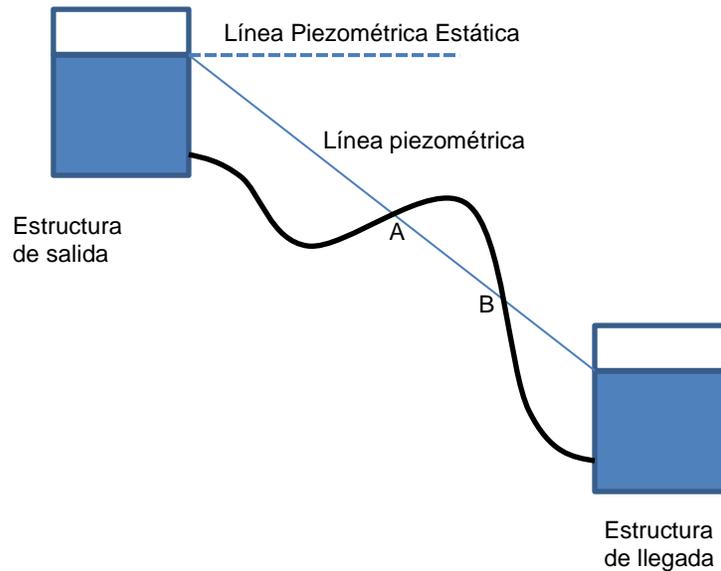


Figura 3. Tubería debajo de la línea piezométrica estática, pero encima de la línea piezométrica.

En el último caso (figura 3) la tubería está encima de la línea piezométrica y la línea piezométrica estática es un sifón, por lo cual se deben instalar los elementos necesarios para cebarlo.

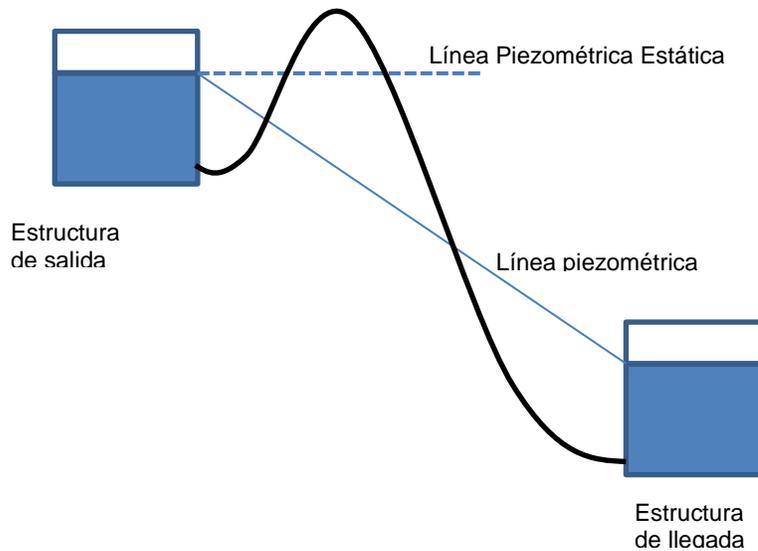


Figura 4. Tubería encima de la línea piezométrica y de la línea piezométrica estática.

En el trazado se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones básicas<sup>8</sup>:

- ✓ El trazado de la línea de conducción debe ser lo más recto posible de estructura a estructura y realizarse por terrenos que no sean de propiedad privada o, de lo contrario, garantizar las servidumbre para evitar expropiaciones.
- ✓ El trazado debe tener un acceso que permita el ingreso de maquinaria para facilitar las revisiones e inspecciones, en caso de una reparación o mantenimiento.
- ✓ El trazado debe garantizar que la línea piezométrica esté por encima de la tubería para evitar presiones negativas. La línea piezométrica debe estar por lo menos 5 metros por encima del punto más alto de la tubería, como se detalla en la figura 1.
- ✓ Se deben instalar los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento, como sistemas de purgas, válvulas ventosas anclajes en los cambios de dirección, etc.

### 3.1.2 Hidráulica de la conducción

La hidráulica de los conductos está determinada básicamente por dos aspectos: a) la resistencia al flujo en conexión con las presiones necesarias y b) la velocidad de flujo requerida<sup>9</sup>.

Un factor importante que se debe analizar en el diseño de la conducción es la resistencia debido a la fricción de las paredes de las tuberías que transportan el flujo, cuando son de largas longitudes. Mientras que las pérdidas ocasionadas por los cambios de dirección y otros accesorios localizados son despreciables; no obstante, se deben cuantificar.

El problema se traduce en determinar estas pérdidas por fricción, ya que dependen del diámetro de la tubería, de su material y del caudal transportado.

La fórmula de Darcy-Weisbach<sup>10</sup> es la más común para determinar las pérdidas:

$$hf = f * \left(\frac{l}{d}\right) * \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

Donde:  $hf$  = pérdida de carga  
 $f$  = factor de fricción (adimensional)  
 $l$  = longitud de la tubería  
 $d$  = diámetro interno de la tubería  
 $g$  = aceleración de la gravedad

El factor de fricción ( $f$ ) depende de la rugosidad absoluta de la tubería y de su diámetro ( $d$ ). La relación  $e/d$  se conoce como la rugosidad relativa. Así mismo, el factor de fricción ( $f$ ) depende del número de Reynolds ( $R$ ) y de la naturaleza del flujo, si es laminar o turbulento.

---

<sup>8</sup> Resolución 1096 del 2000, RAS 2000, Título B. Sistemas de Acueducto. MVDT (2012).

<sup>9</sup> Fair, Geyer & Okun (1996). *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*, vol I. México: Editorial Limusa.

<sup>10</sup> Ibid.

El número de Reynolds se define como  $R = \frac{\rho VL}{\mu}$ <sup>11</sup>

Donde  $\rho$  = densidad del fluido  
 $V$  = velocidad media  
 $L$  = longitud del conducto  
 $\mu$  = viscosidad cinemática

El flujo laminar se presenta cuando  $R \leq 2000$ , en cuyo caso  $f$  se determina con la relación  $f = \frac{64}{R}$ <sup>12</sup>.

El paso del flujo laminar al turbulento está precedido de una zona de transición, se establece cuando  $R \geq 4.000$  y la determinación de  $f$  se hace más compleja. Para este caso se emplea la siguiente ecuación de Colebrook y White:<sup>13</sup>

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -2,0 \text{Log} \left( \frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{R * f^{0,5}} \right)$$

Dónde:  $f$  = factor de fricción  
 $\varepsilon$  = rugosidad relativa de la tubería  
 $d$  = diámetro interno  
 $R$  = número de Reynolds

Como se mencionó, determinar el factor de fricción ( $f$ ) es más complejo en la zona del flujo turbulento, ya que para resolver la ecuación de Colebrook - White se requieren métodos numéricos o iteraciones sucesivas.

No obstante, se tienen diagramas que relacionan el factor de fricción ( $f$ ) con las variables de las que él depende, como el número de Reynolds, la rugosidad relativa ( $e/d$ ) y aplican para toda clase de tubería y de flujo; además, definen claramente las zonas de flujo laminar, de turbulencia y de transición. Entre estos diagramas se encuentran el de Moody y el de Hunter Rouse.

El más utilizado es el diagrama de Moody, incluido en la Resolución del RAS 2000. Básicamente estos diagramas son una expresión gráfica de la ecuación de Colebrook-White.

---

<sup>11</sup> White, F. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid: Editorial McGraw-Hill.

<sup>12</sup> Fair, Geyer & Okun. Op cit.

<sup>13</sup> White, F. Op cit.

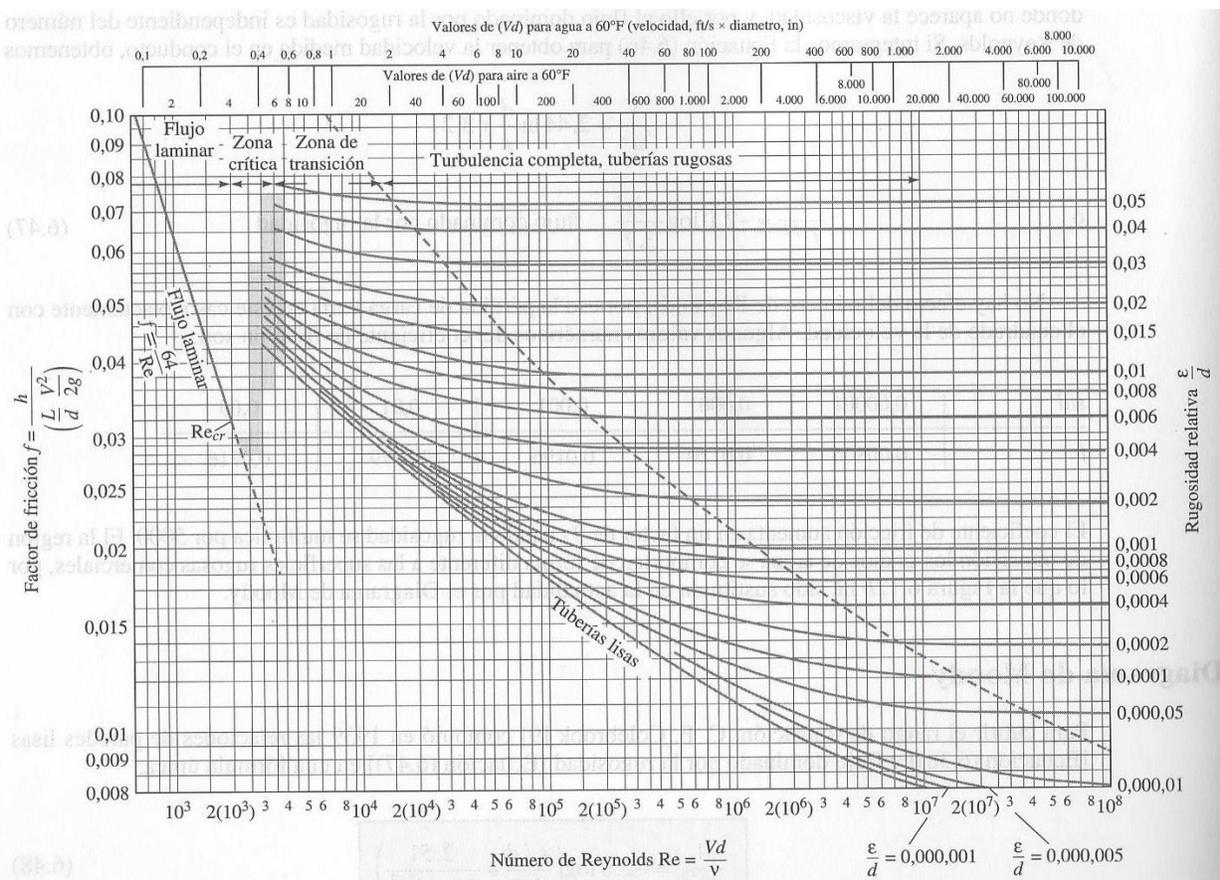


Figura 5. Diagrama de Moody<sup>14</sup>.

Con base en lo anterior, para el cálculo de tuberías se planteó la ecuación de Hazen-Williams, que es más simple y de forma exponencial<sup>15</sup>:

$$Q = 0,2785 * C * D^{2,63} * J^{0,54}$$

Donde:  $Q$  = caudal  
 $C$  = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams  
 $D$  = diámetro de la tubería  
 $J$  = pérdida de carga unitaria

A diferencia del factor de fricción ( $f$ ), el coeficiente  $C$  es un factor de capacidad de carga y no un factor de fricción<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> White, F. Op cit.

<sup>15</sup> López, R. Op cit.

<sup>16</sup> Fair, Geyer & Okun. Op cit.

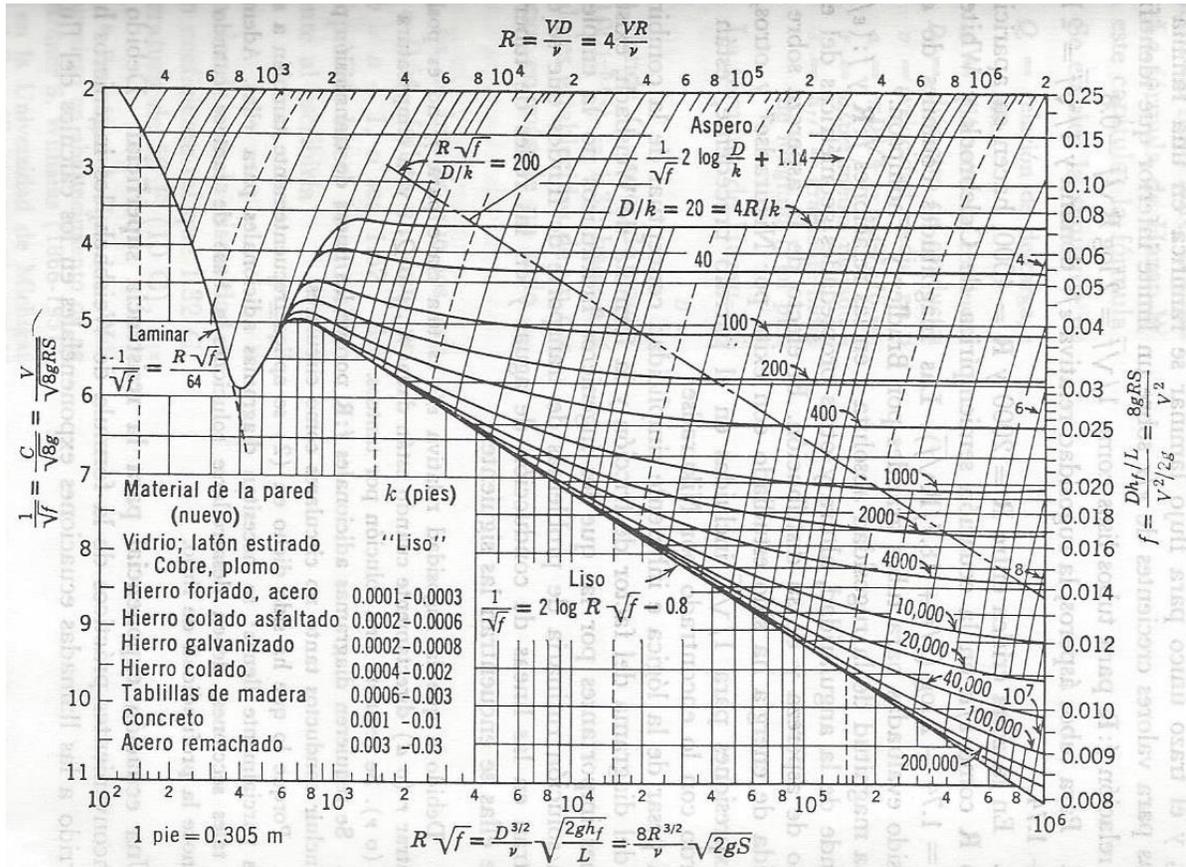


Figura 6. Diagrama de Rouse<sup>17</sup>.

El coeficiente C depende del material de la tubería e, incluso, de su edad. Los valores más usuales se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1 Valores típicos del coeficiente C<sup>18</sup>

Material de la tubería	Coficiente C
Acero remachado (nuevo)	110
Acero remachado (usado)	85
Acero soldado (nuevo)	130
Acero soldado (usado)	90
Hierro fundido (nuevo)	130
Hierro fundido (15-20 años)	100
Hierro fundido (> 20 años)	90
Concreto (buena terminación)	130
Concreto (acabado común)	120
Asbesto cemento	140
Plástico PVC	150

<sup>17</sup> Fair, Geyer & Okun. Op cit.

<sup>18</sup> López, R. Op cit.

Como se observa, por la forma de la ecuación de Hazen-Williams su solución es más sencilla.

El avance en los programas de cálculo y modelación de redes incluyen análisis con las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, además han hecho más común el uso de la expresión de Hazen-Williams, lo cual hoy ya no es una limitante.

### 3.1.3 Pérdidas menores

Los cambios de dirección en la tubería, las derivaciones, las reducciones, las válvulas y demás accesorios producen pérdidas de energía que se deben cuantificar. Por estar ubicadas en puntos o zonas específicas también se les conoce como pérdidas localizadas, las cuales se determinan con la siguiente ecuación, en términos de carga de velocidad<sup>19</sup>:

$$h_{fl} = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde:  $h_{fl}$  = pérdida de carga localizada  
 $k$  = coeficiente de pérdida  
 $v$  = velocidad del agua  
 $g$  = aceleración de la gravedad

Algunos valores típicos del coeficiente  $k$  se relacionan en la tabla 2.

Tabla 2 Valores típicos del coeficiente  $k$  de pérdidas menores

Elemento	Coeficiente $k$ <sup>20</sup>	Coeficiente $k$ <sup>21</sup>	Coeficiente $k$ <sup>22</sup>
Reducción gradual	0,15		
Ampliación gradual	0,30		
Compuerta abierta	1,00		
Válvula abierta de ángulo	5,00	5,00	5,00
Válvula abierta de compuerta	0,20	0,20	0,20
Válvula abierta de globo	10,00	10,00	10,00
T de paso directo	0,60	0,30	0,30
T de paso lateral	1,30		
T de salida bilateral	1,80	1,50	1,80
Válvula de pie	1,75		
Válvula de retención	2,50		2,50
Entrada normal al tubo	0,50		0,50
Entrada de borda	1,00	0,50	
Salida del tubo	1,00		1,00
Contracción brusca		0,30-0,50	
Codo 90°		0,50-1,00	
Codo 45°		0,40-0,75	0,40
Codo 22,5°		0,25-0,50	

<sup>19</sup> Fair, Geyer, Okun. Op cit.

<sup>20</sup> López, R. Op cit.

<sup>21</sup> Fair, Geyer, Okun. Op cit.

<sup>22</sup> Resolución 1096. Op cit.

Medidor Venturi		0,30	
Codo de radio corto			0,90
Codo de radio medio			0,80
Codo de gran radio			0,60
Unión			0,03

### 3.2 Redes de distribución

#### 3.2.1 Aspectos generales

Las redes de distribución reparten el agua en la población y pueden ser abiertas, cerradas o mixtas. Se componen de redes matrices o principales y de redes menores o secundarias. Las primeras se distribuyen en mallas y las segundas llevan el líquido a las viviendas.

Las redes abiertas se componen de una o dos tuberías principales, de las cuales se derivan las tuberías secundarias. Las redes cerradas, generalmente se conforman en mallas de tres o cuatro manzanas. Por su parte, las redes mixtas se componen de una o varias mallas cerradas, de las que se derivan ramales abiertos.

La red de distribución se traza según la topografía de la población y su planteamiento urbanístico. En general, se proyectan por las vías públicas, en los andenes o zonas peatonales y, en lo posible, no cruzan terrenos privados, para evitar servidumbres y expropiaciones<sup>23</sup>.

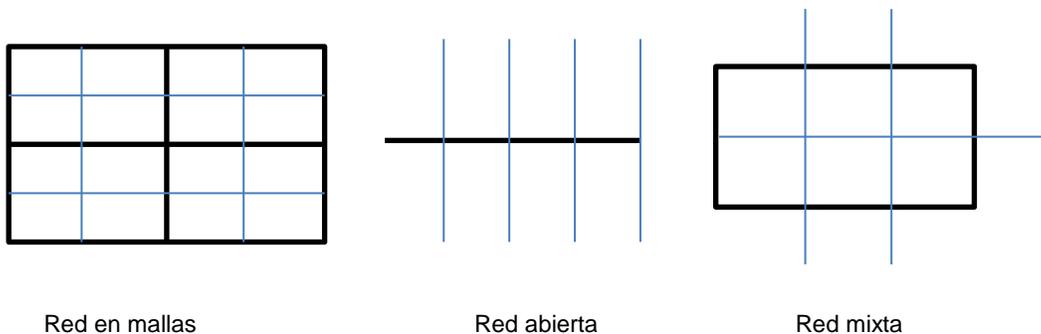


Figura 7. Esquemas de los tipos de redes<sup>24</sup>.

Se deben tomar las precauciones necesarias para evitar el cruce con otras redes y conservar las distancias mínimas, tanto en el sentido horizontal como en el vertical.

#### 3.2.2 Hidráulica de las redes de distribución

Cuando las redes de distribución son cerradas o en mallas su cálculo es un poco dispendioso, ya que se deben nivelar las presiones y los caudales en cada nudo de la

<sup>23</sup> Resolución 1096. Op cit.

<sup>24</sup> López, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, 1ª. Ed. Bogotá; Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Figuras adaptadas.

mallas, por cualquier sentido de flujo. Esto se logra mediante métodos iterativos, el más común es el de Cross. Para el cálculo se utilizan las mismas expresiones hidráulicas que se emplean para calcular de la conducción.

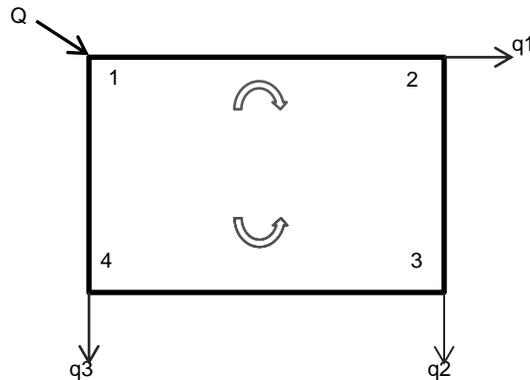


Figura 8. Esquema de una red tipo malla<sup>25</sup>

Para que funcione la malla que se representa en la figura 7 se debe cumplir que las pérdidas de energía de las rutas 1, 2, 3 y 1, 4, 3 sean iguales.

Este método supone unos caudales iniciales  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ , cuya suma debe ser igual a  $Q$ , y predimensiona los diámetros. Al determinar las pérdidas en el punto 3, por cualquiera de las dos rutas, éstas deben ser iguales, lo que generalmente no ocurre, por lo que se deben corregir los caudales para determinar nuevamente las pérdidas. Así se procede sucesivamente hasta lograr la igualdad en las pérdidas o el “equilibrio” en la malla. Se debe tener en cuenta que para los nuevos caudales obtenidos su suma debe ser igual al caudal  $Q$ .

La diferencia de presión se puede establecer según lo indique la norma que se esté aplicando. En los antecedentes detallamos que, según las normas del Insfopal, el error de cierre era de 1 m y en el RAS 2000 de 0,5. Lo cual significa que si tomamos el valor de 0,5 m las pérdidas de la ruta 1, 2, 3 no deben diferir en más o menos 0,5 m a las determinadas en la ruta 1, 4, 3. Cuando se logra esta diferencia se puede decir que la malla está equilibrada y que tanto los caudales como los diámetros son los definitivos.

Actualmente este método no se utiliza, ya que las redes se calculan en programas de modelación hidráulica como el Epanet.

---

<sup>25</sup> Ibid.

## 4. MARCO LEGAL PARA EL DISEÑO DE ACUEDUCTOS

En el capítulo 1 se hizo un resumen de la normatividad en Colombia referente a los sistemas de acueducto y a través del marco teórico, que se presentó en los capítulos 2 y 3, se establecieron los principales elementos de los sistemas de acueducto que se pueden analizar y modificar para formular proyectos más económicos. Sin embargo, también se hace necesario conocer la reglamentación que regula actualmente la construcción y el funcionamiento de los sistemas de acueducto.

### 4.1 Generalidades

Antes de la expedición del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 1998, no era clara la normatividad del sector y las entidades municipales, departamentales y nacionales tenían como base las “Guías para presentación, diagnóstico y diseño de sistemas de acueducto” del Insfopal o, en su defecto, normas de diseño locales, que en muchos casos eran una derivación de éstas.

Algunas entidades tenían sus propias normas, elaboradas y estructuradas por sus áreas técnicas. Mientras que otras, al no tener claridad sobre algún tema, acudían a los textos especializados en el área y tomaban decisiones con base en ellos.

Al respecto es pertinente resaltar que en las décadas del setenta y ochenta algunos autores de estos textos eran reconocidos ingenieros, especializados en el tema de aguas y, presumiblemente, conocedores de la realidad nacional, lo cual ha permitido que estos documentos sigan siendo de gran utilidad como soporte y consulta de diseño.

De acuerdo con lo anterior, y con el fin de unificar la reglamentación, el gobierno nacional, por intermedio del Ministerio de Desarrollo Económico, expidió la Resolución 822 del 6 de agosto de 1998, “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 98”.

Dicho reglamento fue objeto de una revisión, que originó la Resolución 1096 del 17 de noviembre del 2000, con la que se adoptó el RAS 2000, que actualmente está vigente y del que se han expedido algunos decretos reglamentarios modificando algunos aspectos.

### 4.2 Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000

A través del Decreto 1112 de 1996 del Ministerio de Desarrollo Económico se creó el Sistema Nacional de Información sobre Medidas de Normalización y Procedimientos de Evaluación de la Conformidad, cumpliendo con los compromisos internacionales

adquiridos por Colombia<sup>26</sup>. Dicho decreto ordenó la revisión y actualización de la reglamentación del sector de agua potable.

Con base en este decreto se realizó la revisión del RAS 98, la cual se sometió a consulta pública nacional y se envió a la Organización Mundial de Comercio, a los países del Pacto Andino y a los países socios del TLC, quienes no presentaron objeciones<sup>27</sup>.

Como resultado de esta revisión se expidió el RAS 2000, reglamento que establece los procedimientos que se deben cumplir en el ámbito nacional en cuanto al diseño, construcción y operación de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, dando cumplimiento a lo dispuesto en la Ley 142 de 1994 o de servicios públicos.

La estructura de este reglamento se divide en tres secciones<sup>28</sup>:

Sección I. Título A: Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico.

Sección II. Contiene los siguientes títulos:

- B. Acueducto
- C. Potabilización
- D. Recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales
- C. Tratamiento de aguas residuales
- F. Aseo urbano
- G. Aspectos complementarios

La sección III contiene el Título H: Listado completo de normas técnicas colombianas y extranjeras que se aplican a los productos terminados.

De estas secciones la que más interesa en el desarrollo del presente estudio es el Título B, Sistemas de acueducto, en su versión actualizada en el 2012, y la sección A.3. Determinación del nivel de complejidad del sistema.

#### 4.2.1 Título A. Nivel de complejidad del sistema

El nivel de complejidad del sistema es el primer elemento que se debe identificar en el municipio, ya que de éste dependen los parámetros de diseño que se van a utilizar en el estudio del sistema que se está proyectando.

Según lo indica el Título A, la clasificación se determina según la población y la capacidad económica de los usuarios, como se detalla en la tabla 3.

La población es la que se determina al final del periodo de diseño, además se debe considerar la población flotante.

---

<sup>26</sup> El decreto se consultó en la página

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=32038>.

<sup>27</sup> Resolución 1096 del 2000, RAS 2.000, Título A. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2000.

<sup>28</sup> El decreto se consultó en la página

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=32038>.

Tabla 3 Nivel de complejidad del sistema<sup>29</sup>

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana al final del periodo de diseño	Capacidad económica de los usuarios
Bajo	< 2.500	Baja
Medio	2.501 a 12.500	Baja
Medio alto	12.501 a 60.000	Media
Alto	> 60.000	Alta

El mismo título establece cómo determinar la capacidad económica de los usuarios, indicando la siguiente metodología<sup>30</sup>:

- a) Estratificar los municipios de acuerdo con la metodología establecida por el DNP.
- b) Establecer los salarios promedio del municipio.
- c) Conocer el ingreso personal promedio del municipio.
- d) Cualquier otro método.

La metodología más común es la que se indica en el literal a), por cuanto está contenida en la Ley 617 del 2000, expedida por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, por medio de la cual los alcaldes están obligados a categorizar sus municipios cada año y especifica los rangos de categorización o estratificación, como se muestra la tabla 4.

Tabla 4 Categorización de los municipios<sup>31</sup>

Categoría	Población habitantes	Ingresos anuales corrientes de libre destinación en SMMLV
Especial	≥ 500.001	> 400.000
1	100.001 - 500.000	> 100.000 - 400.000
2	50.001 - 100.000	> 50.000 - 100.000
3	30.001 - 50.000	> 30.000 - 50.000
4	20.000 - 30.000	> 25.000 - 30.000
5	10.001 - 20.000	> 15.000 - 25.000
6	≤ 10.000	≤ 15.000

Como se observa en las tablas 3 y 4, los municipios que se ubican en los niveles de complejidad bajo y medio no superan la quinta categoría, razón por la cual los ingresos corrientes de libre destinación son inferiores a \$16.108,75 millones, según el salario mínimo mensual del 2015, que estaba en \$644.350.

<sup>29</sup> Resolución 1096 del 2000, RAS 2.000, Título A. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. 2000.

<sup>30</sup> Ibid.

<sup>31</sup> Ley 617 de 2000, consultada en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3771>.

Para ejemplificar esta afirmación se presenta la ilustración 14<sup>32</sup>, en la cual se observa el mapa de categorización del departamento de Boyacá para el año 2013, del que se destaca lo siguiente: Tunja se ubica en la categoría 2; Duitama, Puerto Boyacá y Sogamoso en la categoría 3; Nobsa en la categoría 4; Paipa y Chiquinquirá en la categoría 5, y los 106 municipios restantes en la categoría 6, lo que equivale al 93,80% de los municipios.

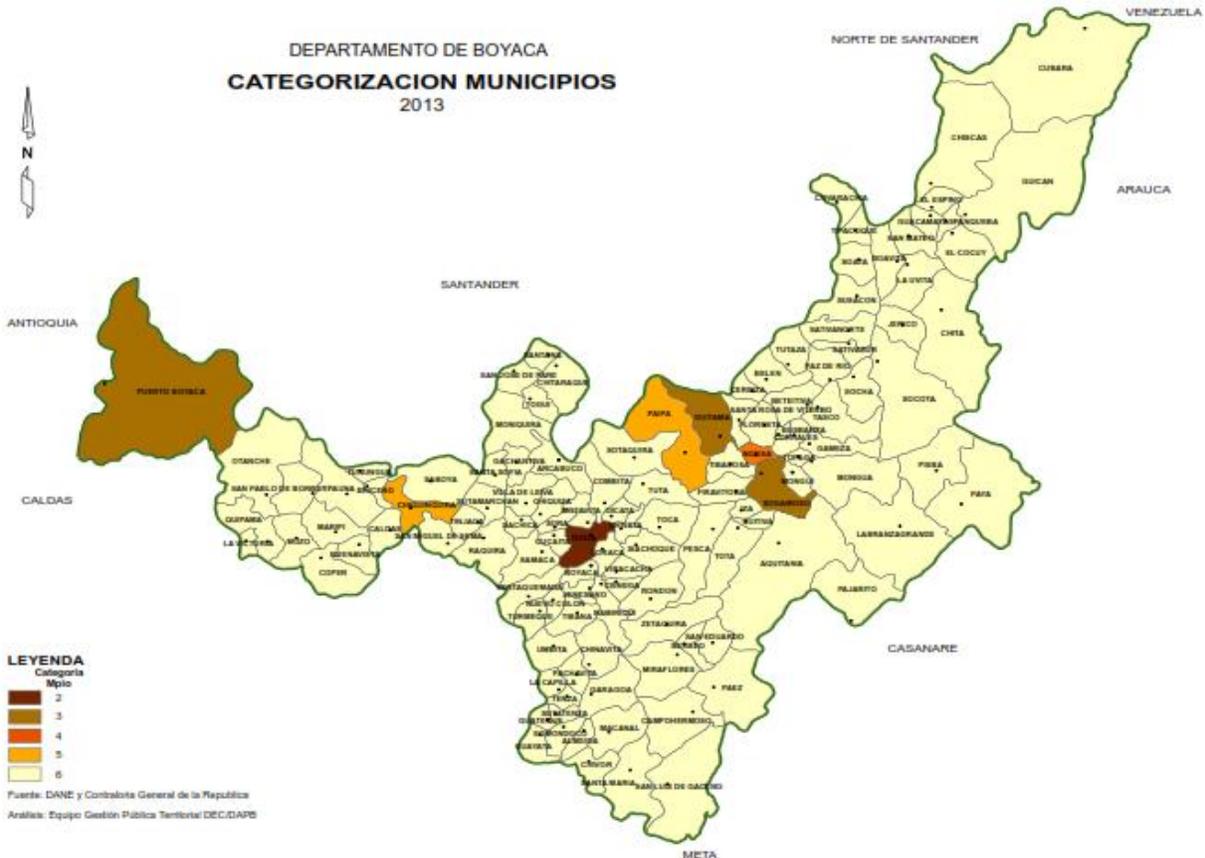


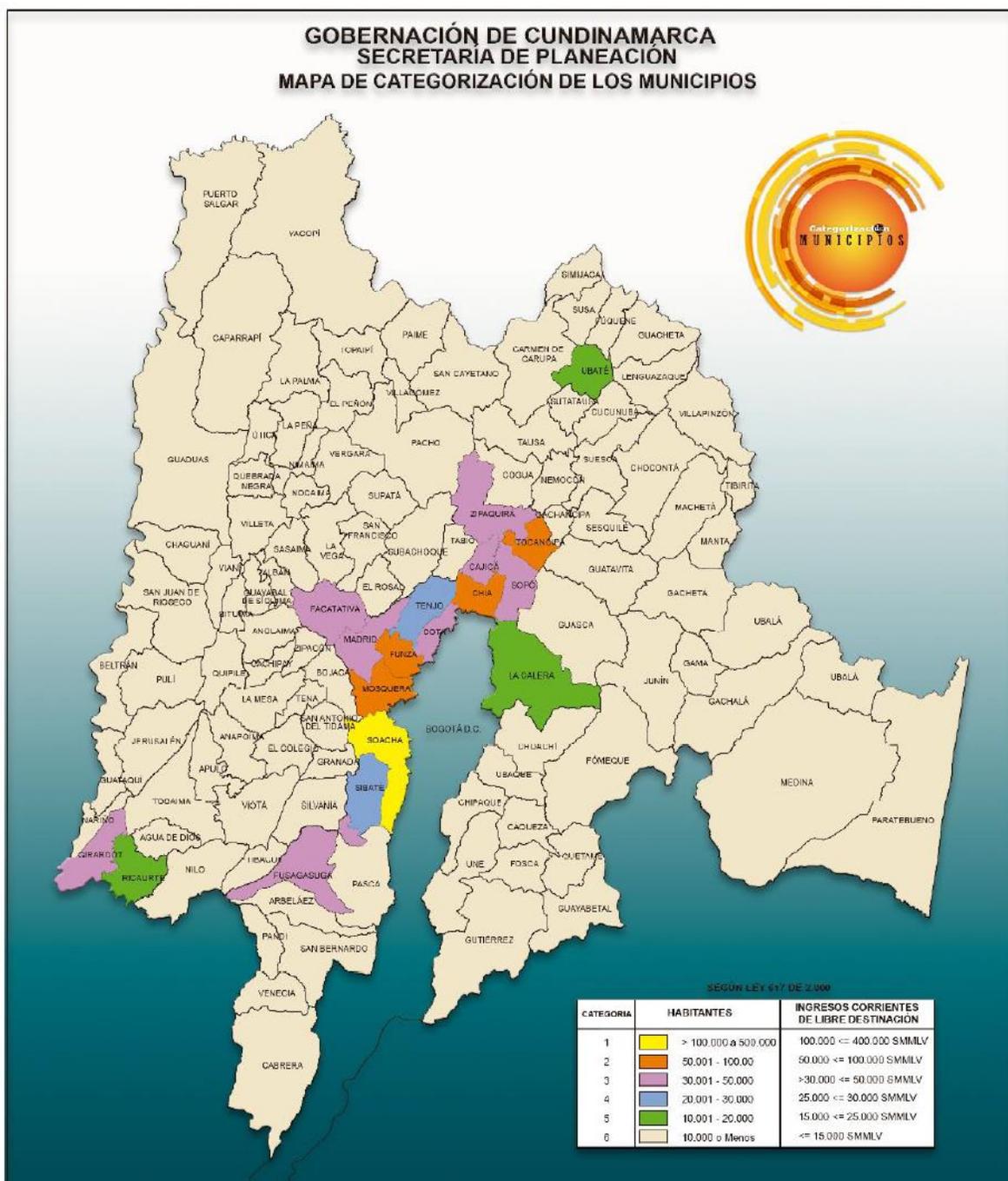
Ilustración 14 Mapa de categorización de los municipios del departamento de Boyacá

En la ilustración 15<sup>33</sup> se observa el mapa de categorización del departamento de Cundinamarca para el año 2014, del que se destaca lo siguiente: Soacha se ubica en la categoría 1; Funza, Mosquera, Chía y Tocancipá en la categoría 2; Girardot, Fusagasugá, Cota, Cajicá, Madrid, Facatativá, Zipaquirá y Sopó en la categoría 3; Sibaté y Tenjo en la categoría 4; Ricaurte, La Calera y Ubaté en la categoría 5, y los 98 restantes en la categoría 6, lo que equivale al 84,48% de los municipios.

<sup>32</sup> Informe de viabilidad financiera del departamento de Boyacá. <http://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2014/05/BOYACA-VIABILIDAD-FISCAL-2013-2.pdf>.

<sup>33</sup> Secretaría de Planeación de Cundinamarca. Categorización de los municipios <http://www.cundinamarca.gov.co/wps/wcm/connect/c61aa01f-469f-4b26-9693-1b0f4c4c102e/Categorizacion-Municipios-SecPlaneaci%C3%B3n.pdf?MOD=AJPERES>.

En estos dos departamentos, ubicados en la región andina, se tiene que el 89,08% de los municipios (de un total de 229) se encuentran en categoría 6.



*Ilustración 15 Mapa de categorización de los municipios del departamento de Cundinamarca*

Al respecto es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El nivel de complejidad se otorga teniendo en cuenta el mayor de los dos requisitos, población o capacidad económica.
- La categorización se otorga por el menor rango de los dos criterios. Por ejemplo, si un municipio supera los 20.000 habitantes, pero sus ingresos corrientes de libre destinación no están por encima de los 25.000 SMMLV, se ubica en categoría 5 y no en la 4.
- Al asignar el nivel de complejidad del sistema se debe tener en cuenta que la población indicada en la tabla 3 pertenece al casco urbano y está proyectada al final del periodo de diseño, y la población relacionada en la tabla 4 es actual y para todo el municipio, incluyendo las áreas urbana y rural.

#### 4.3 Resolución 2320 de 27 noviembre de 2009

Esta resolución la expidió el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para reglamentar las dotaciones neta y bruta, y el periodo de diseño. En la tabla 5 se relaciona el periodo de diseño para los sistemas de acueducto y alcantarillado, que dependen del nivel de complejidad del sistema.

*Tabla 5 Periodo de diseño para los sistemas de acueducto y alcantarillado* <sup>34</sup>

<b>Nivel de complejidad del sistema</b>	<b>Periodo de diseño máximo</b>
Bajo, medio y medio alto	25 años
Alto	30 años

#### 4.4 Título B. Sistemas de acueducto

El Título B determina los lineamientos que se deben seguir en el diseño, la construcción, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de un sistema de acueducto, sin contemplar el tratamiento, del cual trata el Título C.

En la tabla 6 se relaciona el contenido del Título B.

*Tabla 6 Contenido del Título B del RAS 2000*<sup>35</sup>

<b>Componente</b>	<b>Capítulo</b>
Aspectos generales de los sistemas de acueducto	B.1
Demanda de agua	B.2
Fuentes de abastecimiento de agua	B.3
Captaciones de agua superficial	B.4
Captaciones de agua subterránea	B.5
Aducciones y conducciones	B.6
Redes de distribución	B.7
Estaciones de bombeo	B.8

<sup>34</sup> Resolución 2320 de 2009. MAVDT, 27 noviembre de 2009. Consultada en la página <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38487>.

<sup>35</sup> Resolución 1096 del 2000, RAS 2000, Título B. Sistemas de Acueducto. MVDT. 2012.

Tanques de almacenamiento y compensación	B.9
Análisis de vulnerabilidad y gestión del riesgo	B.10

Para el desarrollo de este proyecto interesan los capítulos B.6 y B.7, en lo relacionado con los diámetros y demás parámetros hidráulicos.

No obstante, es importante analizar el contenido del capítulo B.2, Demanda de agua, para comprender el origen de los caudales de diseño de los componentes que analizaremos.

#### 4.4.1 Caudal de diseño

En el análisis de los caudales de diseño se deben contemplar los usos del agua; la proyección de usuarios, que incluye el alcance de la población que se va a abastecer, y la dotación neta, que se determina para cada usuario del sistema.

Además, junto con lo anterior se deben determinar las pérdidas del sistema para establecer la dotación bruta. Por último, se debe determinar la demanda de agua, que se puede estimar por usuario o por población.

En caso de que la empresa prestadora de servicio o alguna otra entidad mantenga un registro histórico del consumo o demanda de agua, esta información puede servir como base para calcular la demanda futura. Así mismo, al momento de realizar las proyecciones se deben tener en cuenta las zonas de expansión del municipio y los usos de suelo que tendrán dicha áreas.

A continuación se describen brevemente los componentes necesarios para determinar el caudal de diseño, según lo establece el Capítulo 2, Demanda de agua, del Título B.

##### 4.4.1.1 Usos del agua<sup>36</sup>

Los principales usos del agua que se deben analizar son los siguientes: residencial, comercial, industrial, fines públicos, escolar e institucional.

- Residencial

Hace referencia al uso del agua por parte de los habitantes para el consumo doméstico, aseo personal, alimentación, lavado de ropa, aseo residencial, etc.

- Comercial

Se refiere al uso que dan los establecimientos de comercio, incluyendo las oficinas. En el caso de los restaurantes o locales de comidas se debe analizar su capacidad y sus características para determinar el consumo.

- Industrial

Es el consumo de las fábricas o industrias. Este aspecto se debe analizar con detalle, ya que en muchas poblaciones existen industrias pequeñas que funcionan dentro de las viviendas.

---

<sup>36</sup> Resolución 1096 del 2000, RAS 2000, Capítulo 2, Título B. Sistemas de acueducto. MVDT. 2012.

- Fines públicos

Este uso se refiere al lavado, aseo y mantenimiento de las áreas públicas del municipio, como parques, jardines, fuentes, etc.

- Escolar

Este es un usuario muy particular, ya que se debe analizar la población educativa junto con su permanencia en la institución.

- Institucional

Son establecimientos con fines específicos como el Palacio de Gobierno, el Palacio de Justicia, los hospitales, los cabildos, los centros de reclusión, las estaciones de policía y batallones militares, etc.

Algunas poblaciones integran dentro de su área de servicio o perímetro de servicio zonas rurales o intermedias llamadas suburbanas, que también se deben tener en cuenta para el análisis del caudal de diseño.

#### 4.4.2 Proyección de los usuarios

Se puede realizar determinando las proyecciones de la demanda, de los suscriptores y de la población.

Las dos primeras se utilizan en caso de que la empresa prestadora del servicio cuente con datos históricos; sin embargo, no todas tienen esta información, razón por la cual la que más se usa es la proyección de la población, para lo cual se utilizan los datos de los censos del DANE y para la población actual los datos oficiales que posea el municipio.

Para esto último se utiliza el censo de usuarios junto con el porcentaje de cobertura, que se puede tomar de datos del Sisbén, de información de la Secretaría de Gobierno o quien haga sus funciones, o de cualquier información oficial o no oficial, pero soportada en estudios confiables.

Para la proyección de la población se utilizan los métodos de cálculo aritmético, geométrico y exponencial, y se selecciona el que mejor se ajuste al histórico de la población.

Aunque no es necesario explicar cada método de cálculo para la proyección de la población, porque no hace parte del objetivo de este proyecto, en la tabla 7 se presenta un resumen de ellos.

*Tabla 7 Métodos de cálculo para la proyección de la población <sup>37</sup>*

Método de estimación	Nivel de complejidad del sistema			
	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Aritmético, geométrico y exponencial	X	X		

<sup>37</sup> Resolución 1096 del 2.000, RAS 2.000, capítulo 2, Título B. Sistemas de Acueducto. MVDT. 2012

Aritmético, geométrico, exponencial y otros			X	X
Por componentes (demográfico)			X	X
Detallar zonas y densidades			X	X
Gráfico	X	X		

#### 4.4.3 Dotación neta

Es la cantidad de agua que se requiere para satisfacer las necesidades básicas de una población. Se puede determinar mediante dotación por suscriptores o dotación por habitante/día. La más común es la dotación por habitante, que se indica en la tabla 8<sup>38</sup>. En esta dotación no se consideran las pérdidas del sistema.

En las tablas 8 a 15 se establecen los consumos netos según el uso del agua<sup>39</sup>

*Tabla 8 Dotación neta por habitante*

Nivel de complejidad del sistema	Dotación neta (L/hab*día) Clima frío y templado	Dotación neta (L/hab*día) Clima cálido
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

*Tabla 9 Consumo neto comercial*

Tipo de comercio	Consumo de agua
Oficinas	20 L/m <sup>2</sup> *día
Locales comerciales	6 L/m <sup>2</sup> *día
Mercados	100 L/local*día
Lavanderías de autoservicio	40 L/kilo de ropa seca
Clubes deportivos y servicios privados	150 L/asistente*día
Cines y teatros	6 L/asistente*día

*Tabla 10 Consumo neto industrial*

Tipo de industria	Consumo de agua (L/trabajador*jornada)
Industrias donde se manipulan materiales y sustancias que ocasionan desaseo	100
Otras industrias	30

*Tabla 11 Consumo neto por tipo de industria*

Industria	Rango de consumo (m <sup>3</sup> /día)
Azucarera	4.5 - 6.5
Química	5.0 - 25.0
Papel y celulosa	40.0 - 70.0
Bebidas	6.0 - 17.0
Textil	62.0 - 97.0

<sup>38</sup> Ibid.

<sup>39</sup> Ibid.

Siderúrgica	5.0 - 9.0
Alimentos	4.5 - 5.0

Tabla 12 Consumo neto fines públicos

Tipo de instalación	Consumo de agua
Entretenimiento (teatros públicos)	6 L/asistente*día
Deportes al aire libre, con baño y vestidores	150 L/asistente*día
Recreación social (deportivos municipales)	25L/asistente*día

Tabla 13 Consumo neto escolar

Establecimiento educativo	Consumo de agua
Educación elemental	20 L/alumno*jornada
Educación media y superior	25 L/alumno*jornada

Tabla 14 Consumo neto institucional

Establecimiento institucional		Consumo de agua
Salud	Hospitales, clínicas, centros de salud	800 L/cama*día
	Orfanatos y asilos	500L/huésped*día
Seguridad	Cuarteles	150L/persona*día
	Cárceles	150L/interno*día

Tabla 15 Consumo neto hoteles

Clasificación	Consumo en hoteles (L/habitación*día)			
	Municipios turísticos		Otros municipios	
	Clima frío y templado <sup>40</sup>	Clima cálido	Clima frío y templado	Clima cálido
Gran turismo	1.200	2.000	600	1.000
4 y 5 estrellas	900	1.500	450	750
1 a 3 estrellas	600	1.000	300	400

Es importante destacar que la dotación neta que se indica en la tabla 7 hace referencia a la modificación hecha por la Resolución 2320 de 2009, expedida por el MAVDT, incluida en el Título B que se publicó en el 2012.

#### 4.4.4 Pérdidas en el sistema de acueducto

Se refieren a las pérdidas técnicas y comerciales. Las primeras incluyen fugas en tuberías, accesorios, válvulas y otras estructuras, así como el rebose de tanques, plantas de tratamiento, estaciones de bombeo y demás componentes del sistema.

Las pérdidas comerciales son las que ocurren en el funcionamiento, operación y mantenimiento del sistema de redes a cargo de la empresa prestadora del servicio, las cuales no deben superar el 7%.

La dotación neta final es la suma de todas las dotaciones presentes en el municipio, según el uso del agua.

<sup>40</sup> Se entiende por clima templado y frío altitudes mayores a 1.000 m.s.n.m.

#### 4.4.5 Dotación bruta

Según la Resolución 2320 de 2009<sup>41</sup>, para todos los niveles de complejidad la dotación bruta se calcula con la siguiente expresión, donde las pérdidas no deben superar el 25%.

$$dbruta = \frac{dneta}{1-\%p}$$

Donde:  $dbruta$  = dotación bruta  
 $dneta$  = dotación neta  
 $\%p$  = porcentaje de pérdidas máximo admisible

#### 4.4.6 Demanda de agua<sup>42</sup>

El cálculo de la demanda de agua se puede realizar por suscriptores o población, el más común es este último. Se determina el caudal medio diario, el máximo diario y el máximo horario.

##### 4.4.6.1 Caudal medio diario (Qmd)

Corresponde al promedio diario de los consumos de caudal en un periodo de un año, según la población se determina de la siguiente forma:

$$Qmd = \frac{p \times dneta}{86.400}$$

Donde:  $Qmd$  = caudal medio diario, en L/s  
 $p$  = población en número de habitantes  
 $dneta$  = dotación neta en L/habitante\*día

##### 4.4.6.2 Caudal máximo diario (QMD)

Es el que se presenta en el día de máximo consumo durante el periodo de un año, se calcula con la siguiente expresión:

$$QMD = Qmd \times k1$$

Donde.  $QMD$  = caudal máximo diario  
 $Qmd$  = caudal medio diario  
 $k1$  = coeficiente del consumo máximo diario

El coeficiente  $k1$  es igual a 1,30 para todos los niveles de complejidad.

##### 4.4.6.3 Caudal máximo horario (QMH)

Es el caudal que se presenta en la hora de máximo consumo durante un periodo de un año, se determina con la siguiente expresión:

---

<sup>41</sup> Resolución 2320 de 2009. MAVDT, 27 noviembre de 2009. Consultada en la página <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38487->

<sup>42</sup> Resolución 1096 del 2000, op cit.

$$QMH = QMD \times k2$$

Donde:  $QMH$  = caudal máximo horario  
 $QMD$  = caudal máximo diario  
 $k2$  = coeficiente de consumo máximo horario.

El coeficiente  $k2$  varía entre 1,30 y 1,50, se aplica a todos los niveles de complejidad del sistema.

Según las características de la población y de acuerdo con el nivel de complejidad del sistema se debe considerar el caudal de incendios.

Como se explicó, en los capítulos B.6 y B.7 se encuentran los parámetros y condiciones de diseño, construcción y mantenimiento para la conducción y redes de distribución, respectivamente. A continuación se presenta un resumen de los caudales de diseño y demás componentes.

#### 4.5 Parámetros de conducción<sup>43</sup>

##### 4.5.1 Caudal de diseño

Este caudal depende del nivel de complejidad del sistema, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16 Caudal diseño de la conducción

Nivel de complejidad	Caudal de diseño
Bajo y medio (sin almacenamiento)	QMH
Bajo y medio (con almacenamiento)	QMD
Medio alto y alto	QMD

##### 4.5.2 Diámetro mínimo

Para cualquier nivel de complejidad, el diámetro nominal mínimo es de 75 mm (3 pulgadas).

##### 4.5.3 Velocidades

Para cualquier nivel de complejidad, la velocidad mínima es de 0,50 m/s y la máxima de 6 m/s.

#### 4.6 Parámetros redes de distribución<sup>44</sup>

##### 4.6.1 Caudal de diseño

Para todos los niveles de complejidad del sistema, el caudal de diseño será el máximo diario (QMH).

##### 4.6.2 Presión en la red de distribución

Las presiones en la red de distribución se relacionan a continuación.

<sup>43</sup> Resolución 1096 del 2000, op cit.

<sup>44</sup> Resolución 1096 del 2000, op cit.

Tabla 17 Presiones máximas y mínimas en la red de distribución

Nivel de complejidad del sistema	Presión dinámica mínima	Presión estática máxima
Bajo y medio	98,1 kPa (10 mca)	490,5 kPa (50 mca)
Medio alto y alto	147,2 kPa (15 mca)	

#### 4.6.3 Diámetros mínimos

Estos diámetros se relacionan en las tablas 18 y 19, teniendo en cuenta el nivel de complejidad del sistema, y si la red es matriz o principal o si es menor o secundaria.

Tabla 18 Diámetros mínimos en red matriz

Nivel de complejidad del sistema	Diámetro mínimo
Bajo y medio	100 mm (4 pulgadas)
Medio alto	150 mm (6 pulgadas)
Alto	300 mm (12 pulgadas)

Tabla 19 Diámetros mínimos en redes secundarias

Nivel de complejidad del sistema	Diámetro mínimo
Bajo y medio	50 mm (2 pulgadas)
Medio alto	100 mm (4 pulgadas) zonas comerciales 62,5 mm (2.5 pulgadas) zonas residenciales
Alto	150 mm (6 pulgadas) zonas comerciales 75 mm (3 pulgadas) zonas residenciales

#### 4.6.4 Velocidades

Para todos los niveles de complejidad, la velocidad mínima es de 0,50 m/s y la máxima está regulada según el material de la tubería, como aparece en la tabla 20.

Tabla 20 Velocidades máximas permisibles en la red

Material	Velocidad (m/s)
Acero sin revestimiento	5.0
Acero con revestimiento	4.0
Hierro dúctil	4.0
CCP	3.0
PVC y PVCO	6.0
PEAD	5.0
GRP	6.0
Polipropileno	6.0

Tanto para la conducción como para las redes de distribución, la hidráulica del diseño se explicó en el capítulo correspondiente.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Después de los análisis técnico y legal resulta pertinente revisar el componente económico, que es importante para seleccionar una posible alternativa de costo mínimo.

Según el Título A, se debe hacer el análisis socioeconómico utilizando el método de costo-eficiencia o con la metodología del costo mínimo de expansiones de capacidad. Se analiza la segunda por ser la que más se emplea para determinar la factibilidad económica de los proyectos.

### 5.1 Costo-eficiencia

Este análisis se basa en tener el menor costo a valor presente neto de las alternativas seleccionadas, teniendo en cuenta los beneficios de cada una.

### 5.2 Costo mínimo de expansiones de capacidad

El análisis de costo mínimo se basa en fijar el año óptimo para realizar una expansión de capacidad del sistema, como lo establece el “Análisis de la metodología de costo mínimo de expansiones de capacidad de la Universidad de los Andes”, del año 2001.

El primer paso consiste en establecer la función de costos, con base en los costos históricos de diferentes sistemas para diversos caudales, A través de un método de regresión se estima la función de costos.

Otra forma para estimar la función de costos es predimensionar varias estructuras para diferentes caudales, estimando el costo para cada una y estableciendo con un modelo de regresión la función de costos.

En general, la función de costos de cualquier componente del sistema tiene la siguiente forma:<sup>45</sup>

$$C(Q) = K \times Q^b$$

Donde:  $C(Q)$  = costo total de una estructura instalada para unas determinadas unidades  $Q$  de capacidad.  
 $K$  = constante, que representa el costo de capacidad.  
 $b$  = factor de economía de escala.

---

<sup>45</sup> Alean Suárez (2002). Análisis de la metodología de costo mínimo de expansiones de capacidad. Bogotá: Universidad de los Andes.

Como se describió, los procesos descritos para determinar la función de costos son dispendiosos, razón por la cual se tomó el documento “Análisis de la metodología de costo mínimo de expansiones de capacidad”, de la Universidad de los Andes, el cual determinó la función de costos con datos suministrados por la CRA.

Dicho documento analiza los componentes de captación de fondo y lateral; el pozo de succión; el desarenador; la conducción en tanques superficiales, semienterrados, enterrados y elevados; las PTAP convencional, compacta y de filtración lenta, y la estación de bombeo.

Para la conducción, la ecuación de función de costo es de la forma:<sup>46</sup>

$$C(Q) = 14.227 \times Q^{0,81}$$

La metodología se determina de la siguiente manera:

- Determinar las capacidades actuales del sistema u oferta disponible. Es claro que de no existir la conducción la capacidad de oferta es cero.
- Establecer la demanda actual y futura, que no es más que el caudal de diseño en el año inicial o el que se esté estudiando.
- Determinar el déficit o excedente de capacidad del componente, que se obtiene restando la demanda actual de la capacidad instalada. Si el resultado es positivo hay excedente y si es negativo déficit. En este caso se determina el tiempo de retraso  $t_0$ , es decir, la fecha que se presentó el déficit con respecto a la demanda, esta fecha se representa en tiempo. Esta situación se denomina “cuello de botella”.
- Determinar los valores de  $r$  y  $b$ , siendo  $r$  la tasa social de descuento representativa para el proyecto y  $b$  el factor de economía de escala. Se recomienda un valor de  $r$  en el 12%.
- Establecer los periodos óptimos de expansión sin déficit y con déficit inicial, lo cual se determina mediante unas ecuaciones derivadas de la elasticidad de costos y del costo de oportunidad. A continuación se analizan las ecuaciones de crecimiento lineal sin déficit inicial y con déficit inicial<sup>47</sup>.
- Crecimiento lineal de la demanda sin déficit inicial. Se supone que se cubre la demanda en el momento exacto de requerir la ampliación y se determina con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2,6 \times (1-b)^{1,12}}{r}$$

Donde:  $t$  = periodo óptimo de diseño en años  
 $b$  = factor de economía de escala  
 $r$  = tasa social de redescuento.

---

<sup>46</sup> Ibid.

<sup>47</sup> Ibid.

- Crecimiento lineal de la demanda con déficit inicial. En este caso, el modelo incorpora el periodo de retraso  $t_0$ , que es el periodo en el que la demanda ha permanecido insatisfecha.

$$t_1 = t + \frac{(1-b^{0,7})}{r} + \frac{t_0^{0,9}}{(t_0+t)^{0,6}}$$

Donde:  $t_1$  = periodo óptimo de diseño con déficit inicial  
 $t$  = periodo óptimo sin déficit inicial  
 $t_0$  = periodo de retraso en años  
 $b$  = factor de economía de escala  
 $r$  = tasa social de redescuento

A manera de ejemplo se estudia una conducción para una población de 2.500 habitantes al final del periodo de diseño, lo cual la ubica en el nivel de complejidad bajo.

Se establece un 2% como tasa de crecimiento, que es una tasa usual en Colombia y la proyección de población se hace geométricamente.

Se adopta una dotación de 125 L/hab\*día, con pérdidas máximas admisibles de 25%. Los datos de población se relacionan en la tabla 21, y los caudales de diseño en la tabla 22.

Proyección población

r = 2,00%

Año	Población	Variación
2015	1.523	
2020	1.682	2,01%
2025	1.857	2,00%
2030	2.050	2,00%
2035	2.263	2,00%
2040	2.499	2,00%

Población al 2017 1.585

Tabla 21 Proyección población, localidad de 2.500 habitantes

Nivel de complejidad del sistema	Bajo
Población actual	1.523 habitantes
Periodo de diseño	25 años
Población de diseño 25 años	2.499 habitantes
Dotación	125 L/hab día

Pérdidas técnicas 25%  
 Dotación corregida 166,67 L/hab día

Para un Horizonte de 25 años

Doméstico  
 Caudal Medio Diario (Qm) 4,82  
 Factor K1 1,30  
 Caudal Máximo Diario (QMD) 6,27  
 Factor K2 1,40  
 Caudal Máximo Horario (QMH) 8,78

Demanda de agua				
Año	Población	Qmd	QMD	QMH
2015	1.523	2,94	3,82	5,35
2020	1.682	3,24	4,21	5,89
2025	1.857	3,58	4,65	6,51
2030	2.050	3,95	5,14	7,20
2035	2.263	4,37	5,68	7,95
2040	2.499	4,82	6,27	8,78

Datos al 2017	1.585	3,06	3,98	5,57
---------------	-------	------	------	------

Tabla 22 Proyección de demanda de agua

Se parte de la hipótesis de que la población no tiene una conducción y se hace necesario proyectar una. Para este caso la oferta en el año de diseño, 2015, sería de 0 habitantes, lo que nos da un déficit de 1.523 habitantes y un caudal de diseño de 3,82 L/s.

La demanda para el año 2017, cuando se estima que entre en funcionamiento la nueva conducción, es de 1.585 habitantes para un caudal de 3,98 L/s.

Dado lo anterior, el periodo de retraso ( $t_0$ ), que corresponde a la demanda (D), del año 1 (2017) más la demanda represada en el año de diseño (2015), en términos de población sería:

$$D = 1.523 + 1.585 = 3.108 \text{ habitantes}$$

Esta población supera la población de diseño proyectada, razón por la cual se adoptan 2.498 habitantes, que corresponden al año 2040

Con lo anterior  $t_0 = 2040 - 2015 = 25$  años

En este caso se tiene una demanda con déficit inicial, por lo que se incorpora el periodo de retraso  $t_0$ . Así las cosas, se determina el periodo óptimo de expansión con la siguiente expresión:

$$T = 2,6 \cdot (1-b)^{1,12}/r,$$

$$T_i = T + (1 - b)^{0,7}/r + T_0^{0,9}/(T_0 + T)^{0,6}$$

Donde: T = periodo óptimo sin déficit inicial  
Ti = periodo óptimo de diseño con déficit inicial  
b = factor de economía de escala  
r = tasa de descuento. Se estima en un 12%  
t<sub>o</sub> = periodo de retraso en años

Para b = 0,42, T<sub>o</sub> = 25 años y r = 0,12

Reemplazando, se tiene:

$$T = 11,77 + 5,69 + 1,55 = 19,01 \quad T = 19 \text{ años}$$

El año sería 2017 + 19 = 2.036, 4 años menos que el periodo de diseño, que se estableció para el 2040

En este año la población estimada es de 2.308 habitantes, con un caudal de diseño de 5,69 L/s.

Esto significa que se contempla una conducción para un caudal de diseño de 5,69 L/s, y se debe ampliar en el año 2036.

Al final de periodo de diseño la población es 2.499, con un caudal de diseño de 6,27 L/s, es decir, que al sistema actual se adicionarían 0,58 L/s, lo cual equivale a ampliar la conducción en 0,58 L/s a partir del 2036. Esta ampliación se haría construyendo una línea paralela a la proyectada, para transportar los 0,58 L/s. Se debe tener en cuenta que esta segunda línea no debe tener un diámetro menor al mínimo establecido.

Aplicando la ecuación de costos, el valor para la primera línea sería de \$58.177,39, en miles de pesos, la ampliación valdría \$9.151,45, en miles de pesos, para un total de la inversión de \$67.328,84, en miles de pesos.

Si contemplamos la construcción de una sola línea hasta el periodo de diseño, el total de la inversión a valor presente es de \$62.936,13, en miles de pesos, lo cual es menos oneroso que hacer dos conducciones, una el año inicial y la otra al año 19, lo que resulta lógico.

En el caso práctico de este ejemplo se concluye que siguiendo el análisis de costo mínimo resulta más económico proyectar una conducción hasta el periodo de diseño y no contemplar periodos de expansión.

## 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUNICIPIOS DE NIVEL DE COMPLEJIDAD BAJO Y MEDIO

En el capítulo 4, donde se explicó el nivel de complejidad del sistema y se mencionó la categorización de los municipios en Colombia, se hizo referencia a los municipios de Cundinamarca y Boyacá, categorizados para las vigencias 2014 y 2013, respectivamente.

Analizando todo el territorio nacional, la realidad no es diferente de los ejemplos que se referenciaron, ya que 965 municipios de los 1.101 se clasifican en la categoría 6, que equivale al 87,81% del total, para la vigencia de 2015<sup>48</sup>, como se muestra en el gráfico 1.

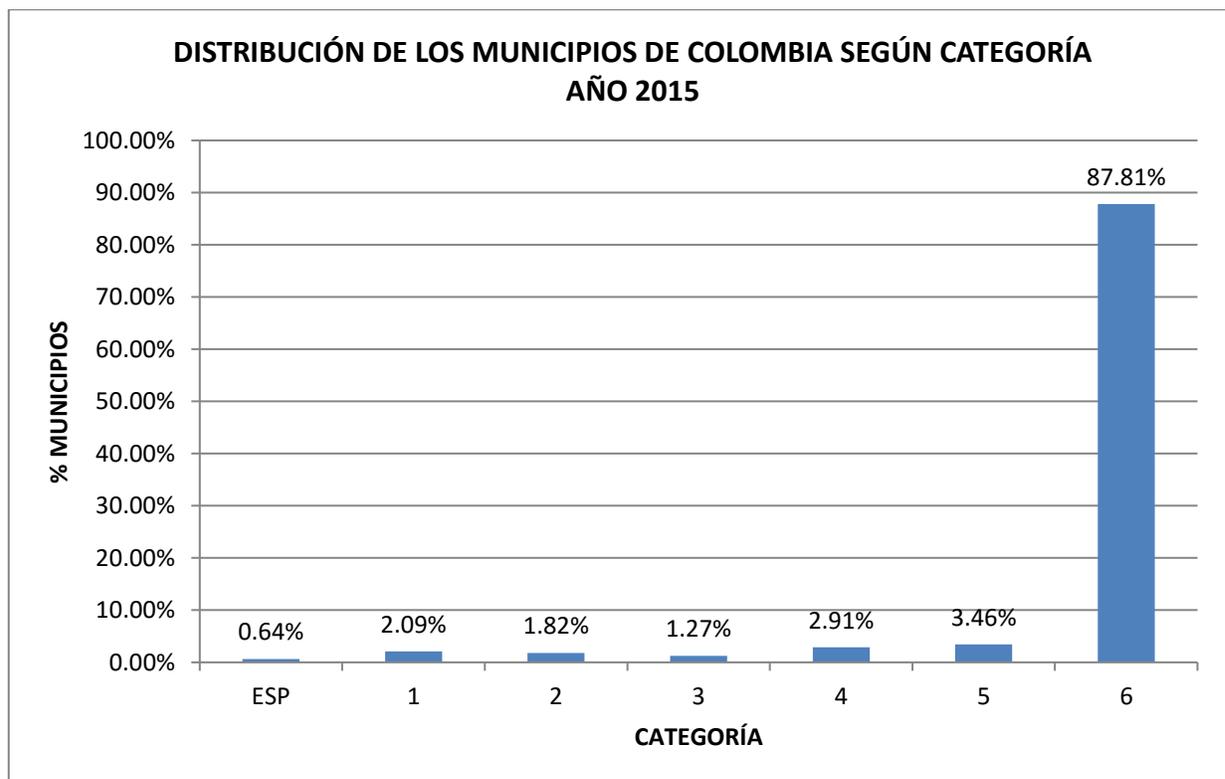


Gráfico 1 . Distribución de los municipios por categoría, vigencia 2015<sup>49</sup>

48

[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZI OEEz/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZI OEEz/).

Según esto, el nivel de complejidad bajo se contempla para poblaciones con 2.500 habitantes o menos y el medio para poblaciones de hasta 12.500 habitantes, que son las que se obtienen al final del periodo de diseño y sólo contemplan la población de la zona urbana.

Aunque los municipios que aparecen en la categoría 6 tienen poblaciones menores de 10.000 habitantes, no se puede inferir de los datos de categorización que el 88% de los municipios en Colombia pertenecen al nivel de complejidad bajo y medio, ya que la población contemplada incluye las zonas urbana y rural.

Por lo anterior, con base en los datos del DANE se estableció la distribución porcentual de cada municipio, tanto para la cabecera como para el sector rural, con respecto a su población total. Ese porcentaje se le aplicó a la población relacionada en la Resolución 578 de 2014, expedida por la Unidad Administrativa Especial de la Contaduría General de la Nación, categorizando los municipios y obteniendo la población de la cabecera para la vigencia 2015<sup>50</sup>.

Como los rangos establecidos para el nivel de complejidad son población futura al final del periodo de diseño, se aplicó una tasa del 2%, tomando como base el método de proyección geométrica y un periodo de diseño establecido. Para cada nivel de complejidad se determinaron los valores de población a 2015 o al año de diseño, los cuales se relacionan en la tabla 21.

*Tabla 23 Nivel de complejidad con los rangos de población al año de diseño*

<b>Nivel de complejidad</b>	<b>Población en la zona urbana (futura al final del periodo de diseño)</b>	<b>Población en la zona urbana (actual al año de diseño, 2015)-</b>
Bajo	< 2.500	< 1.523
Medio	2.501 a 12.500	1.524 a 7.618
Medio alto	12.501 a 60.000	7.619 a 36.571
Alto	> 60.000	> 36.571

Con los valores obtenidos para el año de diseño y la población de la zona urbana para cada municipio a 2015 se estableció el porcentaje de distribución para las localidades ubicadas en la categoría 6, según el nivel de complejidad (gráfico 2).

49

[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz/).

<sup>50</sup> Resolución 578 de 2014,

[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz/).

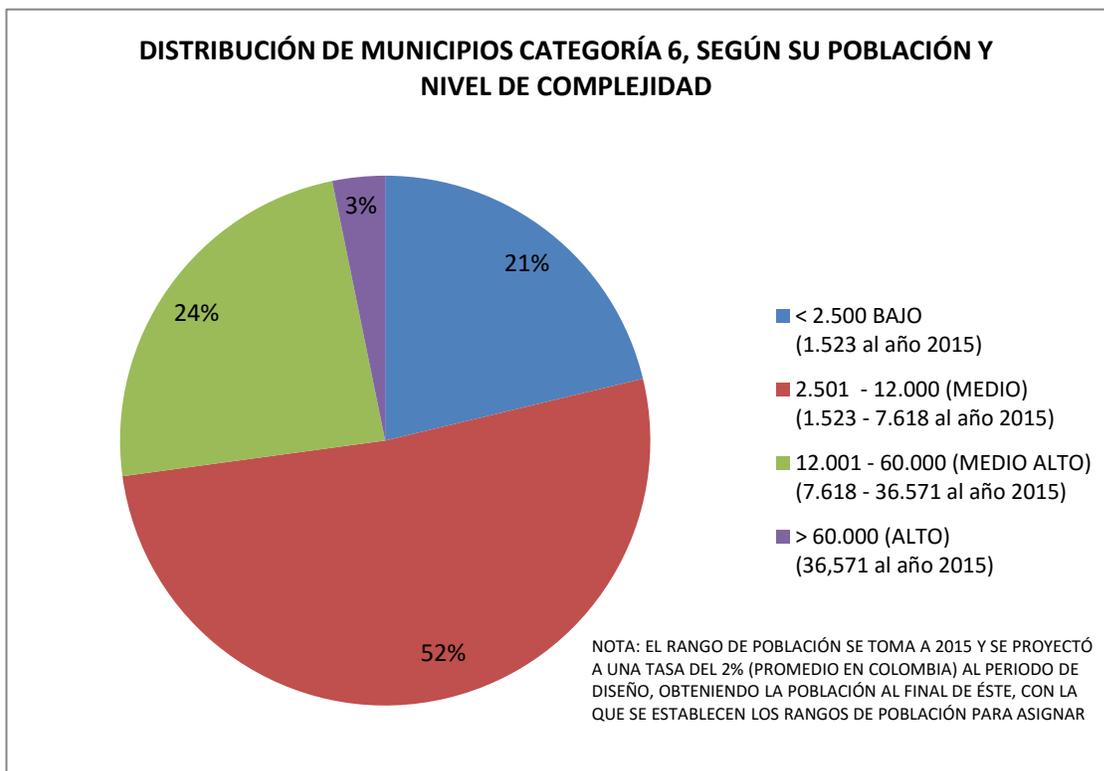


Gráfico 2 Distribución de los municipios de categoría 6, según población vigencia 2015<sup>51</sup>

Según estos porcentajes, el 21% de los municipios de categoría 6 se ubican en el nivel de complejidad bajo y el 52% en el medio, para un total de 73%. Trasladando estos porcentajes al total nacional, el 18,44% de los municipios están en el nivel de complejidad bajo y el 45,66% en el medio. Si en Colombia hay 1101 municipios, entonces 203 están en el nivel de complejidad bajo y 502 en el de complejidad medio, superando el 60% de todos los municipios.

La distribución de los municipios de categoría 6 por departamentos se muestra en el gráfico 3, se observa que la mayoría están ubicados en la región andina. Específicamente, en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Nariño

51

[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGizOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZlQEEz/ y DANE.](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGizOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZlQEEz/ y DANE.)

(región Pacífico) y Santander, que cuentan con un porcentaje de municipios superior al 6% del total.

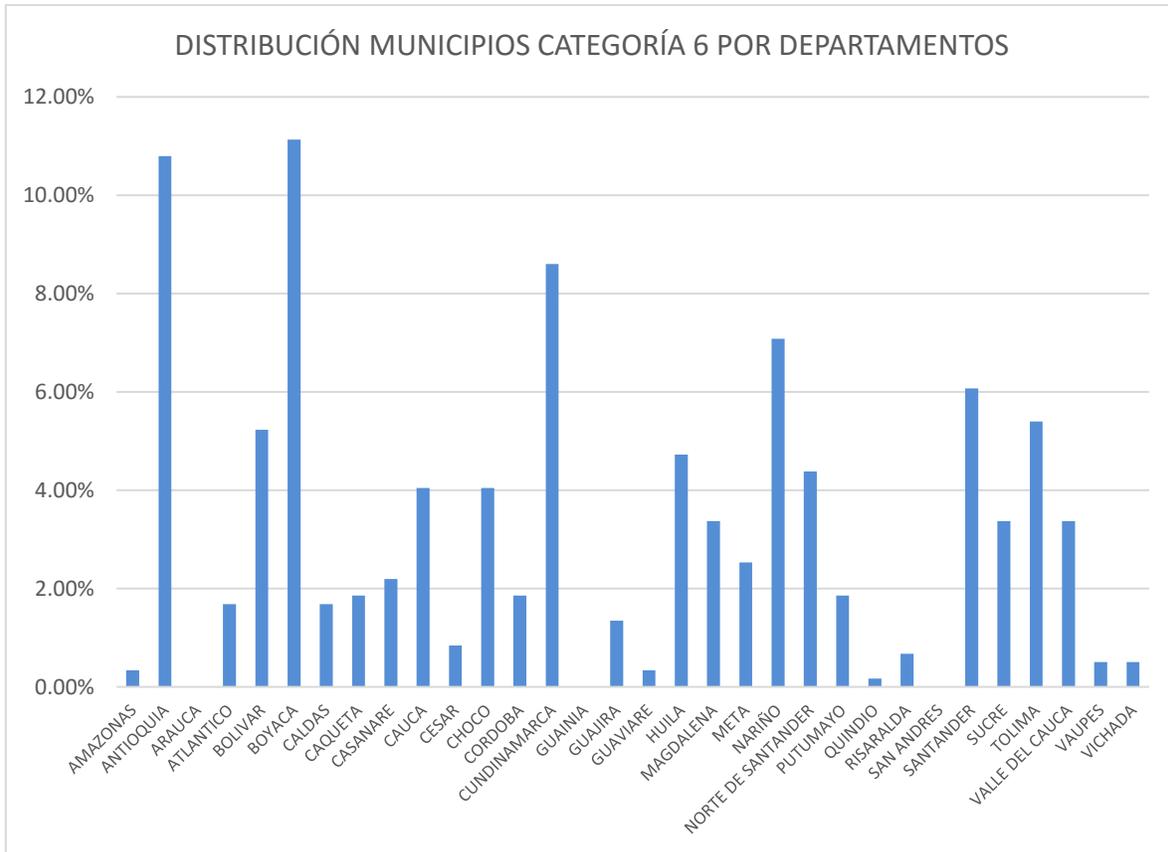


Gráfico 3 Distribución de los municipios categoría 6 por departamentos <sup>52</sup>

Establecer la categorización es un indicador importante para analizar el nivel de inversión que tiene un municipio, ya que el Ingreso Corriente de Libre Destinación (ICLD) es para invertir en todas los sectores, tales como salud, educación, saneamiento básico, recreación, etc., lo cual obliga a solicitar recursos ya sea al departamento o a la nación para invertir en acueductos. Un municipio ubicado en la categoría 6 tiene un ICLD máximo de 15.000 SMMLV, que equivale a \$9.655,25 millones a 2015, aplicando el SMMLV de \$644.350.

Si bien estudios realizados resaltan que la cobertura de acueducto en Colombia para el año de 2011 es del 87,10% para el sector urbano, que en las cabeceras municipales es

<sup>52</sup>

[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGizOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZlQEEz/ y DANE.](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/!ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGizOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKikEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACwLNs!/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZlQEEz/ y DANE.)

del 96% y en el área rural de 56,3%<sup>53</sup>, no mencionan la calidad ni continuidad del servicio, lo cual implicaría un diagnóstico detallado de cada sistema.

En cuanto a la calidad se consultó el Índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano (IRCA), expedido por el Instituto Nacional de Salud en el 2014<sup>54</sup>. La consulta se hizo para los municipios ubicados en el nivel de complejidad bajo y medio, su distribución porcentual se indica en el gráfico 4.

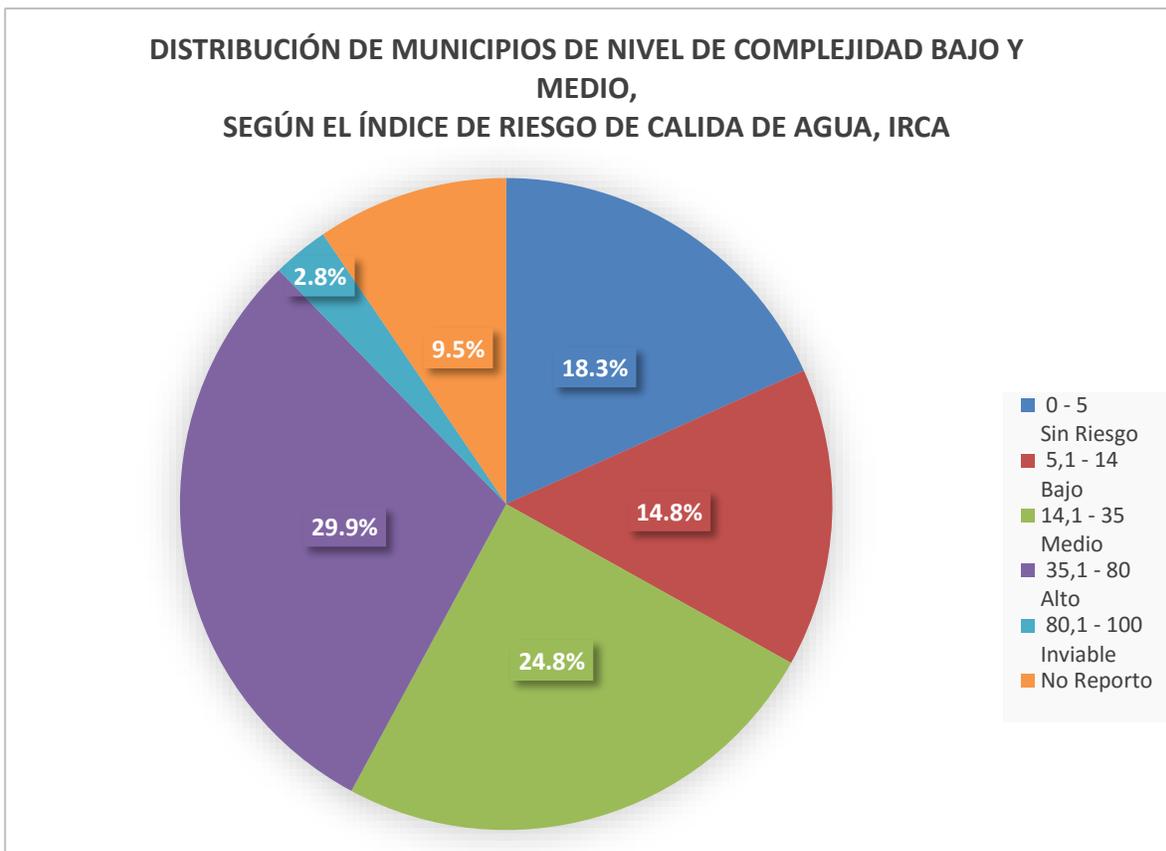


Gráfico 4 Índice de riesgo de calidad de agua para los municipios de nivel de complejidad bajo y medio.

Analizando los resultados del gráfico 4 se observa que 24,8% de los municipios de nivel de complejidad bajo y medio tienen un índice de riesgo medio y 29,9% un índice de riesgo alto, que equivale aproximadamente a 175 y 211 municipios, respectivamente. El dato preocupante es que 2,8% (aproximadamente 20 municipios de nivel de complejidad bajo y medio) toman agua con una calidad deficiente. Esto significa que cerca de 406 municipios consumen agua de baja calidad.

<sup>53</sup> Rodríguez, M.L. (2013). Planes departamentales de los acueductos en Colombia, tesis de grado para obtener el título de Maestría en Ingeniería en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

<sup>54</sup>

[http://www.ins.gov.co/sivicap/Normatividad/2015%20Boletin%20Vigilancia%20Agua%20n%C3%BAmero%202,%20abril%20.pdf?Mobile=1&Source=%2Fsivicap%2F\\_layouts%2Fmobile%2Fmblwp.aspx%3FUrl%3D%252Fsivicap%252FPaginas%252Fsivicap.aspx%26CurrentPage%3D1](http://www.ins.gov.co/sivicap/Normatividad/2015%20Boletin%20Vigilancia%20Agua%20n%C3%BAmero%202,%20abril%20.pdf?Mobile=1&Source=%2Fsivicap%2F_layouts%2Fmobile%2Fmblwp.aspx%3FUrl%3D%252Fsivicap%252FPaginas%252Fsivicap.aspx%26CurrentPage%3D1).

Teniendo en cuenta la información del gráfico 3, se consultaron los avances en los Planes Departamentales de Aguas de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca y Nariño para determinar la existencia de diagnósticos de sus sistemas de acueducto o el estado de este programa en el último año.

En general, los reportes de los PDA consultados no mencionan el diagnóstico general de los componentes del sistema de acueducto, pues su avance se centra en un número de proyectos viabilizados, aprobados y ejecutados, así como las inversiones asignadas para tal fin.

A manera de información se resume lo extraído de cada PDA consultado.

### 6.1 Antioquia

La información refleja únicamente el número de proyectos según su estado, así como el número de municipios vinculados al PAP-PDA. No relaciona montos de inversión ni diagnóstico de sistemas de acueducto.

El resumen de los proyectos según su estado es<sup>55</sup>: formulación 5, en proceso de viabilización 14, viabilizados 81, en contratación 5, adjudicados 12 y en ejecución 15, para un total de 132 proyectos presentados por el PDA.

### 6.2 Boyacá

La *Revista Institucional de la Empresa de Servicios Públicos de Boyacá*<sup>56</sup>, 2014, hace referencia al consolidado hasta ese año y presenta 16 proyectos en ejecución y 11 terminados, para una inversión total de \$39.211 millones.

### 6.3 Cundinamarca

El informe de gestión de empalme 2012-2016<sup>57</sup> hace referencia específicamente a cobertura en el servicio de acueducto para áreas urbanas en el 70% de los municipios del departamento, 104 proyectos de acueductos terminados y 39 en ejecución, para una inversión total de \$295.081 millones.

### 6.4 Nariño

El informe bimensual con corte a mayo-junio de 2015<sup>58</sup> habla de una inversión total hasta la fecha en el componente de infraestructura por un valor de \$15.181 millones, correspondiente al 26% del total de los recursos disponibles, que ascienden a la \$60.932 millones.

El avance proyectado para esa fecha en la ejecución del programa era del 100% y sólo se había ejecutado el 36%.

---

<sup>55</sup> <http://www.pdaantioquia.com/proyectos/mapa.html>.

<sup>56</sup> <http://espb.gov.co/espb/images/stories/RevistaESPB/revista%20ESPB2.pdf>.

<sup>57</sup> <http://www.epc.com.co/docs/INFORME%20DE%20GESTION%202012-2016%20EPC.pdf>.

<sup>58</sup> <http://plandeaguas.xn--nario-rta.gov.co/images/Informe%20Bimensual%20%20mayo-junio%202015%20PAP-PDA%20NARIO.pdf>.

Finalmente, se consultó el Informe nacional de monitoreo, uso y ejecución de los recursos del sistema general de participaciones para agua potable y saneamiento básico (SGP - APSB), vigencia 2014, publicado por el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, del cual se extrae la inversión realizada en acueducto en los años 2012, 2013 y 2014, discriminada por componentes (tabla 22).

INVERSIÓN EN MILES DE PESOS PARA SISTEMAS DE ACUEDUCTO			
COMPONENTE	VIGENCIA		
	2012	2013	2014
Captación	39.331.476	41.905.927	50.294.057
Aducción	6.028.495	7.903.667	8.555.072
Almacenamiento	10.997.348	13.797.707	13.367.206
Tratamiento	64.402.167	53.148.377	42.878.553
Conducción	31.918.971	33.933.159	30.368.314
Macromedición	1.446.411	1.090.942	303.421
Distribución	49.731.785	46.161.217	34.656.064
Micromedición	639.482	1.503.015	1.293.598
Índice de agua no contabilizada	461.511	3.805.785	360.735
Preinversión - Estudios	94.727.393	26.818.041	79.256.345
Interventoría	1.563.108	7.412.888	5.250.625
Fortalecimiento	91.295.653	57.730.016	51.414.170
Subsidios	265.295.883	266.389.784	197.100.413
<b>TOTAL</b>	<b>657.839.683</b>	<b>561.600.525</b>	<b>515.098.573</b>

Tabla 24 Inversión en sistemas de acueducto, discriminada por componentes en miles de pesos<sup>59</sup>

De la tabla anterior se determinan los valores invertidos en miles de pesos, tanto en conducción como en redes de distribución para cada vigencia y que corresponden a, \$81.650.756 para el 2012, \$80.094.376 para el 2013 y \$65.024.378 para el 2014.

Si el 64,10% de los municipios de Colombia pertenecen al nivel de complejidad bajo y medio, ponderando estos porcentajes con los valores invertidos para conducción y red de distribución, tenemos que la inversión en miles de pesos en el 2012 fue de \$52.338.135, el 2013 fue de \$51.340.495 y el 2014 fue de \$41.680.626.

<sup>59</sup> <http://www.minvivienda.gov.co/Lists/InformesSGP/Attachments/7/Informe%20monitoreo%20SGP-APSB%20vigencia%202014.pdf>.

## 7. ESTUDIOS DE CASO

### 7.1 Aspectos generales

Para comprender mejor este estudio es importante evaluar unos casos reales, que se analizan teniendo en cuenta los aspectos técnicos, legales vigentes y económicos, para compararlos luego de hacer la reducción de diámetro tanto en la conducción como en las redes de distribución.

Hay que hacer claridad de que la reducción de diámetros se hace cumpliendo todos los aspectos técnicos y legales, teniendo cuidado de que los parámetros que se incluyen cumplen con la normatividad vigente.

Las modelaciones hidráulicas se realizan en el programa y Epanet LENHS UFPB Brasil<sup>60</sup>, software de distribución gratuita que incluye las expresiones hidráulicas descritas en el capítulo 3 y los parámetros técnicos mencionados en el capítulo 4.

Esta versión de Epanet Brasil tiene un módulo de optimización que incluye los costos unitarios, por lo cual el análisis económico se realiza por el menor precio a valor presente.

Los estudios de caso incluyen poblaciones que el autor de esta tesis ha trabajado en sus diferentes proyectos como profesional. Se escogieron poblaciones clasificadas en niveles de complejidad bajo y medio, según la normatividad.

Primero se describen brevemente los lugares escogidos y posteriormente se realizan los análisis de proyección de la población, de caudales y de las respectivas modelaciones hidráulicas, cumpliendo la normatividad actual.

#### 7.1.1 Análisis de la población

Para este análisis se tomaron los datos de los censos comprendidos entre 1973 y 2005. Para la población actual se tomó el dato divulgado en la página oficial de cada municipio.

Para estimar la población al final del periodo de diseño, con los datos obtenidos anteriormente, se aplicaron los métodos de análisis aritmético, geométrico y exponencial<sup>61</sup>, y un promedio de los resultados obtenidos de cada método, que al final por

---

<sup>60</sup> [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page\\_id=34](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=34).

<sup>61</sup> Resolución 1096 del 2000, op cit.

las características presentadas en cada municipio fue el adoptado para determinar la población futura.

Finalmente, se estimó la población por quinquenios, hasta el periodo de diseño.

#### 7.1.2 Nivel de complejidad del sistema

Una vez se determinó la población al final de periodo de diseño y se revisó la categorización del municipio, se asignó el nivel de complejidad del sistema.

Esto es muy importante, ya que dependiendo del nivel asignado se determinan los parámetros técnicos que se deben emplear para el cálculo hidráulico, en especial, el caudal de diseño.

#### 7.1.3 Caudal de diseño

Posteriormente se determinó la dotación neta siguiendo lo estipulado en la normatividad, se estimaron el caudal medio diario (qmd), el caudal máximo diario (QMD) y el caudal máximo horario (QMH).

La conducción se analiza con el QMD y las redes de distribución con el QMH<sup>62</sup>

#### 7.1.4 Análisis de precios

Para el análisis de precios se consultaron los precios de las tuberías de PVC en diferentes diámetros.

Adicionalmente, se estimaron precios de instalación, excavación y relleno, con los cuales se determinó el valor total por suministro e instalación de tubería.

En general, en el estudio de precios unitarios se consideraron las variables de mayor relevancia; no obstante, es posible considerar otros ítems que permitan estimar en una mejor forma los costos unitarios.

En la tabla 23 se resumen los precios.

Tabla 25 Análisis de precios de tubería PVC acueducto

DIÁMETRO (Pulg.)	6	4	3	2,5	2	1,5	1,25
	PRECIOS (\$)						
<b>EQUIPOS</b>	<b>2.100,00</b>	<b>1.736,00</b>	<b>1.370,00</b>	<b>1.282,00</b>	<b>1.193,00</b>	<b>854,00</b>	<b>824,00</b>
Herramienta menor	900,00	600,00	450,00	375,00	300,00	150,00	125,00
Compactador	1.200,00	1.136,00	920,00	907,00	893,00	704,00	699,00
<b>MATERIALES</b>	<b>35.103,00</b>	<b>19.307,00</b>	<b>11.968,00</b>	<b>8.454,00</b>	<b>5.910,00</b>	<b>5.275,00</b>	<b>4.183,00</b>
Tubería	30.604,67	17.510,97	10.602,21	7.116,02	4.819,41	4.927,87	3.907,65
Accesorios	4.498,39	1.796,39	1.365,86	1.337,70	1.090,85	346,97	275,02
<b>MANO DE OBRA</b>	<b>13.714,44</b>	<b>11.302,96</b>	<b>8.914,35</b>	<b>8.328,63</b>	<b>7.742,90</b>	<b>6.025,74</b>	<b>5.741,45</b>
Excavación	3.714,36	3.516,24	2.847,65	2.806,38	2.765,10	2.179,06	2.162,55

<sup>62</sup> Resolución 1096 del 2.000, RAS 2.000, capítulo 2, Título B. Sistemas de Acueducto. MVDT. 2012

Instalación tubería	6.000,00	4.000,00	3.000,00	2.500,00	2.000,00	1.500,00	1.250,00
Rellenos	4.000,08	3.786,72	3.066,70	3.022,25	2.977,80	2.346,68	2.328,90
<b>TOTAL UNITARIO TUBERÍA</b>	<b>50.917,00</b>	<b>32.346,00</b>	<b>22.252,00</b>	<b>18.065,00</b>	<b>14.846,00</b>	<b>12.155,00</b>	<b>10.748,00</b>

## 7.2 Poblaciones que se estudiaron. Estudio de casos

Para estos estudios se escogieron poblaciones en las cuales el autor de este trabajo participó como ingeniero consultor o ingeniero interventor de consultoría, garantizando un conocimiento muy cercano de cada sistema.

Las poblaciones que se estudiaron son:

Pachavita y Turmequé, Boyacá. San José del Palmar, Chocó

### 7.2.1 San José del Palmar

#### 7.2.1.1 Generalidades<sup>63</sup>

San José del Palmar se encuentra al sureste del Chocó, limita con los departamentos de Risaralda y Valle del Cauca, compartiendo dos ecosistemas de gran importancia: el Parque Nacional Natural de Tatama y la Serranía de Los Paraguas. Limita al norte con el municipio de Condoto (Chocó); al sur con los municipios de Sipí y Novita (Chocó), por el este con los departamentos de Risaralda y Valle del Cauca y por el oeste con el municipio de Novita (Chocó).

La cabecera municipal tiene una altitud de 1.100 msnm, coordenadas: 4° 54' de latitud norte y 76° 15' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Posee una extensión aproximada de 947 km<sup>2</sup>.

En la ilustración 16<sup>64</sup> se ubica el municipio de San José del Palmar en el departamento del Chocó.

#### 7.2.1.2 Descripción del sistema de acueducto<sup>65</sup>

El sistema de acueducto del municipio se compone de los siguientes elementos:

Captación: bocatoma de fondo, en la quebrada Mojahuevos.

<sup>63</sup> <http://www.sanjosedelpalmar-choco.gov.co/presentacion.shtml>.

<sup>64</sup> [http://geoportal.igac.gov.co/mapas\\_de\\_colombia/igac/politicos\\_admin\\_2014/Choco.pdf](http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/igac/politicos_admin_2014/Choco.pdf).

<sup>65</sup> Ramírez Suárez, F. (2007). Revisión y ajuste de diseños para el sistema de acueducto, alcantarillado de aguas residuales y alcantarillado de aguas lluvias, diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR, y diseño de la optimización de la planta de tratamiento de agua potable, PTAP, para el casco urbano del municipio de San José del Palmar (Chocó). Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable con su PTAP y sistema de evacuación de aguas negras con su PTAR para el centro poblado de La Italia. Sistema de abastecimiento de agua potable con su PTAP y sistema de evacuación de aguas negras con su PTAR para el centro poblado de San Pedro.

Aducción, captación – desarenador: tubería de 4”, con una longitud aproximada de 15 m hasta el desarenador.

Desarenador: de flujo horizontal en concreto, con una longitud de 4 m \* 2 \* 3 m de profundidad.

Aducción desarenador - planta de tratamiento: en tubería PVC de 4”, con una longitud aproximada 2.080 m

Planta de tratamiento: compuesta por un filtro lento de arena.

Tanque de almacenamiento: está junto a la planta de tratamiento, es de concreto reforzado y tiene una capacidad aproximada de 280 m<sup>3</sup>.

Conducción tanque - red: en tubería PVC de 6”, con una longitud aproximada de 148 m<sup>3</sup>.

Red de distribución: en tubería PVC de diámetros variables, 6, 4 y 3”.

El estado general de sistema es regular, por cuanto tiene más de 25 años de construido. Se le han realizado algunos remplazos en la conducción desarenador – planta, en la conducción tanque - red de distribución y en algunos tramos de la red de distribución.

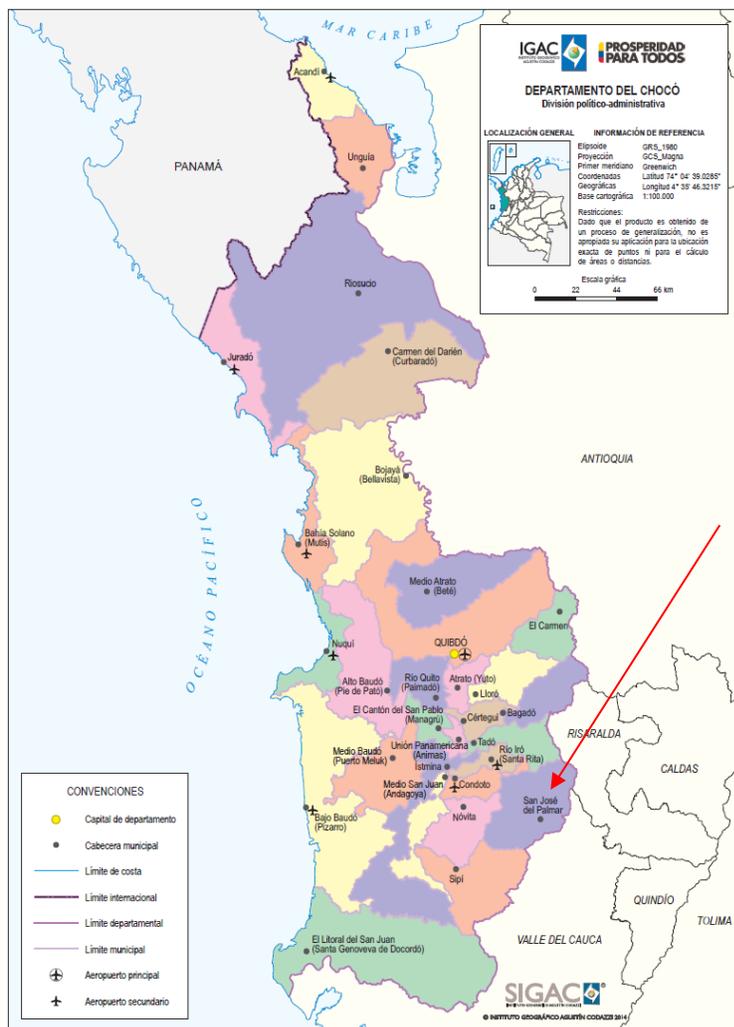


Ilustración 16 Ubicación de San José del Palmar en el departamento de Chocó.

### 7.2.1.3 Parámetros de diseño

#### 7.2.1.3.1 Población y proyección de la población

Como se indicó, se consultaron los censos entre 1973 y 2005, con cuyos datos se proyectó la población hasta el periodo de diseño.

Los datos se relacionan a continuación:

#### Datos censos DANE San José del Palmar

Año	Año censado				Actual
	1973	1985	1993	2005	2015
Cabecera (habitantes)	1.218	1.126	2.021	1.079	1.516

Tabla 26 Población censada<sup>66</sup> y población actual<sup>67</sup> San José del Palmar

Con los datos de la tabla 24 se hicieron las proyecciones aritmética, geométrica y exponencial, cuyos resultados se indican en la tabla 25.

POBLACIÓN PROYECTADA (habitantes)					
Año	Aritmética	Geométrica	Exponencial	Promedio	
2015	1.516	1.516	1.516	1.516	
2020	1.603	1.619	1.610	1.611	
2025	1.690	1.729	1.710	1.710	
2030	1.776	1.847	1.817	1.813	
2035	1.863	1.972	1.930	1.922	
2040	1.950	2.106	2.050	2.035	

Tabla 27 Proyección de población para San José del Palmar.  
Fuente: autor.

Estos cálculos se reflejan en el gráfico 4, donde también se incluye la población censada.

Las proyecciones realizadas por los tres métodos arrojaron resultados muy similares, por lo cual se determinó el promedio de los tres métodos, que fue la población que se adoptó al final para el diseño.

#### 7.2.1.3.2. Nivel de complejidad

Como la población es menor a 2.500 habitantes al final del periodo de diseño, el municipio pertenece a la categoría 6<sup>68</sup>, con un nivel de complejidad bajo.

<sup>66</sup> Fuente DANE.

<sup>67</sup> <http://www.sanjosedelpalmar-choco.gov.co/index.shtml#2>.

<sup>68</sup> [http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPyky0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIKcA.BHA0L6\\_Tzyc1P1C3ljyHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T111VUZVUzI1UTiwQUU3R083MUwxM0gw/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04_Sj9CPyky0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIKcA.BHA0L6_Tzyc1P1C3ljyHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T111VUZVUzI1UTiwQUU3R083MUwxM0gw/).

## CURVA DE POBLACIÓN ACTUAL Y FUTURA SAN JOSÉ DEL PALMAR

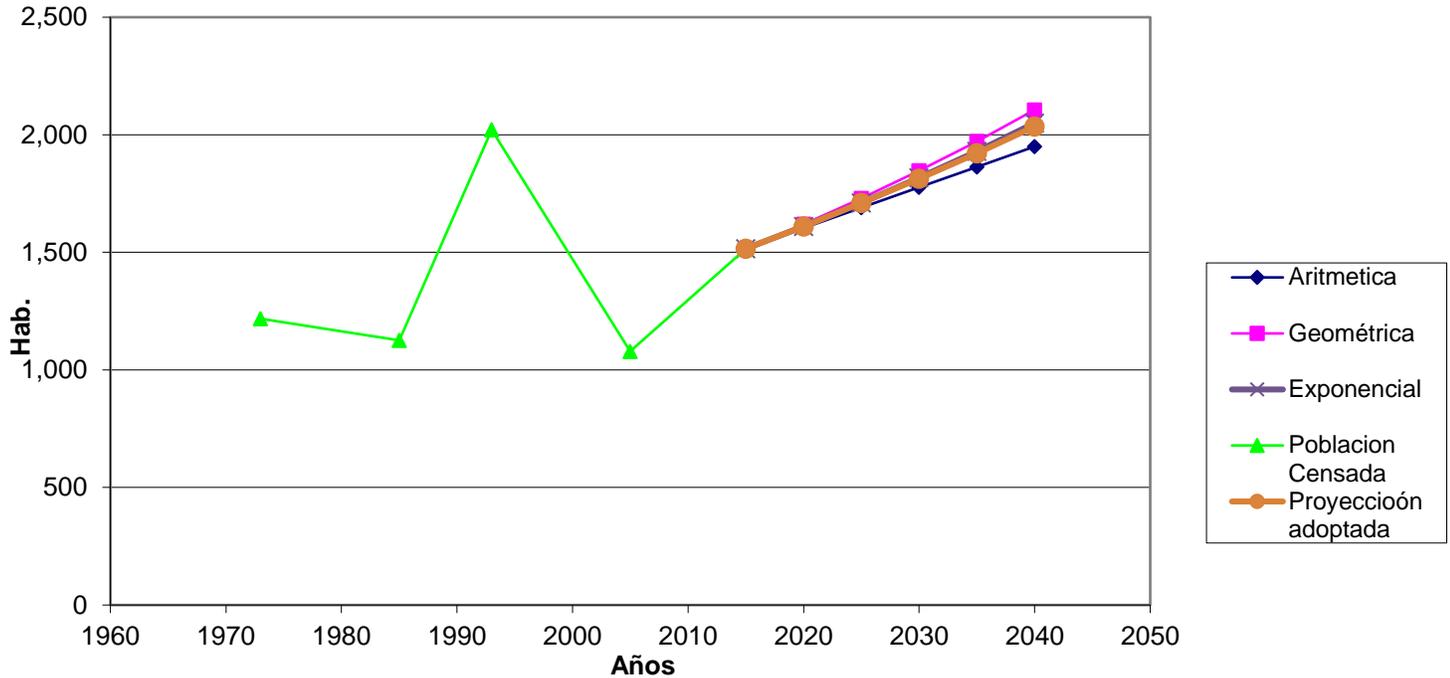


Gráfico 5 . Población actual y futura de San José del Palmar

Fuente: autor.

### 7.2.1.3.3. Caudal de diseño

Dotación	90 L/hab día
Pérdidas técnicas	25%
Dotación corregida	120 L/hab día

	Doméstico
Caudal Medio Diario (Qmd)	2,83 L/s
Factor K1	1,30
Caudal Máximo Diario (QMD)	3,68 L/s
Factor K2	1,50
Caudal Máximo Horario (QMH)	5,52 L/s

Caudal comercial, institucional      18.192,00 L/día      Asumimos 10% del Qmd

Con base en lo anterior se determinó el caudal de diseño para periodos de cinco años hasta el periodo de diseño, los resultados se resumen en la tabla 26.

Demanda de agua				
AÑO	Población (Hab)	Qmd (L/s)	QMD (L/s)	QMH (L/s)
2015	1.516	2,32	3,02	4,53
2020	1.611	2,45	3,19	4,79
2025	1.710	2,59	3,37	5,06
2030	1.813	2,73	3,55	5,33
2035	1.922	2,88	3,74	5,61
2040	2.035	3,04	3,95	5,93

Tabla 28 Caudales de diseño para periodos de cinco años.  
Fuente: autor.

#### 7.2.1.4. Modelación del sistema

Esta modelación se realizó en el programa Epanet Brasil. Este software tiene un módulo adicional de optimización de costos que facilita el análisis económico. Para este cálculo, los precios determinados en la tabla 22 se introducen en el modelo y se corre el módulo de optimización.

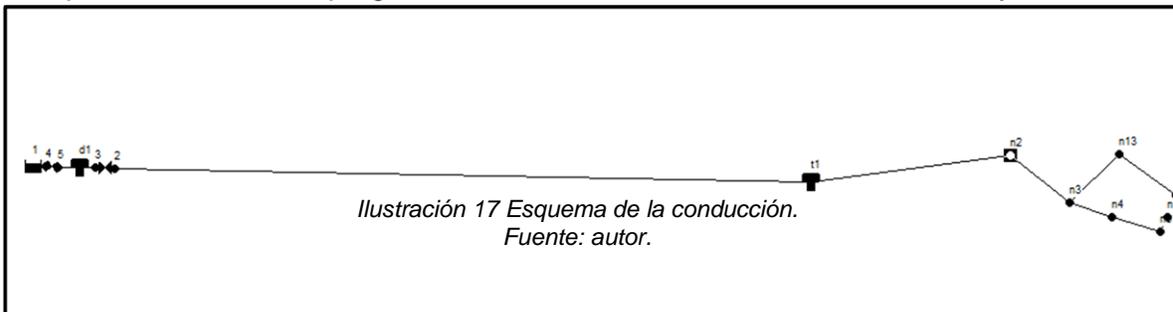
En el caso del análisis de las redes de distribución, los caudales en los nodos se determinaron por el método caudal por metro lineal de tubería, que consiste en dividir el caudal de diseño de la red entre la longitud total de la tubería de la red y, luego, se multiplica este cociente por la longitud de cada tramo.

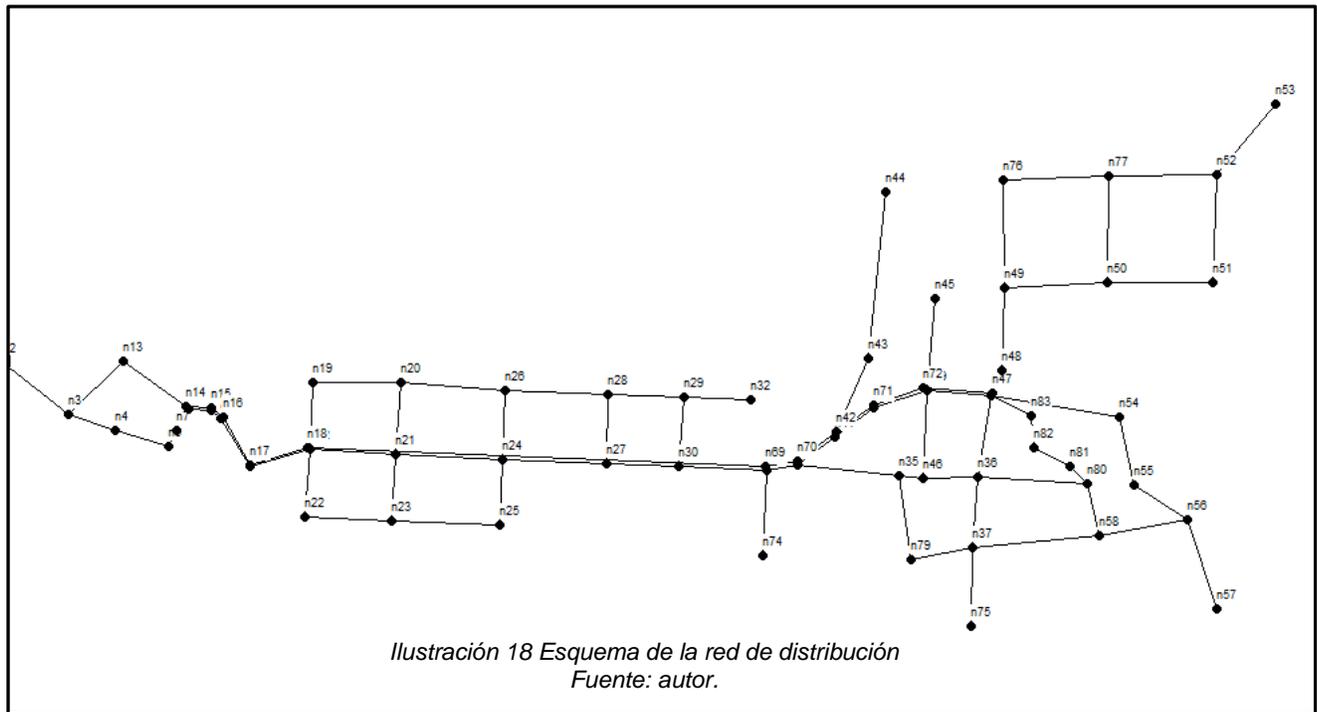
Primero, se realizó la modelación con los diámetros mínimos indicados en la normatividad y, luego, se modeló con la opción optimización, lo que hace posible que el cálculo contemple diámetros menores a los exigidos por la normatividad.

Una vez realizadas las dos opciones de cálculo se hicieron las comparaciones técnica y económica.

#### 7.2.1.5. Esquema del sistema

El esquema se extrae del programa, como se muestra en las ilustraciones 17 y 18.





### 7.2.1.6. Tablas de entrada - nudos y tuberías

San José del Palmar

Tabla de red - Nudos

	Cota	Demanda	Altura
ID Nudo	m	LPS	m
Conexión n2	1121.70	0.00	1158.52
Conexión n3	1115.20	0.00	1158.46
Conexión n4	1097.65	0.07	1158.30
Conexión n6	1095.02	0.08	1158.13
Conexión n7	1092.49	0.00	1158.08
Conexión n8	1089.10	0.03	1158.00
Conexión n9	1085.18	0.02	1157.90
Conexión n10	1079.34	0.08	1157.73
Conexión n11	1087.50	0.03	1157.94
Conexión n12	1077.63	0.09	1157.55
Conexión n13	1115.20	0.00	1158.43
Conexión n14	1089.10	0.00	1158.40
Conexión n15	1087.50	0.00	1158.39
Conexión n16	1085.18	0.00	1158.39
Conexión n17	1079.34	0.00	1158.37
Conexión n18	1077.63	0.00	1158.28
Conexión n19	1075.17	0.09	1157.45
Conexión n20	1074.38	0.22	1157.35
Conexión n21	1076.45	0.12	1157.40
Conexión n22	1075.44	0.09	1157.46

Conexión n23	1070.09	0.21	1157.38
Conexión n24	1071.50	0.15	1157.25
Conexión n25	1062.87	0.25	1157.27
Conexión n26	1071.22	0.02	1157.19
Conexión n27	1068.88	0.14	1156.80
Conexión n28	1067.98	0.24	1156.80
Conexión n29	1066.98	0.20	1156.60
Conexión n30	1067.09	0.10	1156.51
Conexión n32	1066.98	0.09	1156.59
Conexión n33	1059.91	0.12	1156.09
Conexión n34	1058.31	0.04	1155.78
Conexión n35	1069.06	0.14	1155.17
Conexión n36	1058.17	0.19	1154.99
Conexión n37	1058.13	0.19	1154.97
Conexión n38	1069.69	0.09	1154.99
Conexión n39	1066.18	0.08	1155.24
Conexión n40	1063.42	0.07	1155.43
Conexión n41	1060.81	0.06	1155.60
Conexión n42	1060.81	0.00	1157.32
Conexión n43	1053.24	0.12	1157.27
Conexión n44	1041.73	0.24	1157.21
Conexión n45	1066.18	0.13	1155.23
Conexión n46	1071.50	0.15	1155.14
Conexión n47	1069.69	0.00	1156.69
Conexión n48	1067.45	0.04	1156.52
Conexión n49	1074.71	0.11	1156.00
Conexión n50	1082.20	0.14	1155.81
Conexión n51	1092.21	0.15	1155.76
Conexión n52	1096.64	0.30	1155.74
Conexión n53	1099.55	0.13	1155.73
Conexión n54	1075.90	0.18	1154.89
Conexión n55	1070.74	0.10	1154.87
Conexión n56	1070.59	0.09	1154.87
Conexión n57	1070.59	0.13	1154.86
Conexión n58	1070.06	0.38	1154.88
Conexión n69	1059.91	0.00	1157.61
Conexión n70	1058.31	0.00	1157.49
Conexión n71	1063.42	0.00	1157.22
Conexión n72	1066.18	0.00	1157.10
Conexión n74	1055.09	0.12	1156.09
Conexión n75	1054.54	0.10	1154.97
Conexión n76	1054.24	0.15	1155.86
Conexión n77	1089.06	0.30	1155.78
Conexión n79	1054.54	0.12	1155.04
Conexión n80	1070.74	0.35	1154.88
Conexión n81	1070.56	0.30	1154.88
Conexión n82	1070.26	0.15	1154.91
Conexión n83	1070.02	0.00	1154.94
Conexión 2	1316.74	0.00	1165.03
Conexión 3	1316.74	0.00	1317.74

Conexión 4	1319.26	0.00	1319.26
Conexión 5	1319.26	0.00	1317.74
Embalse 1	1319.26	-4.42	1319.26
Depósito t1	1157.68	-2.88	1158.68
Depósito d1	1316.74	0.00	1317.74

Tabla 29 Datos de entrada – Nudos.

Fuente: autor.

San José del Palmar

Tabla de red - Líneas

	Longitud	Diámetro	Rugosidad
ID Línea	m	mm	mm
Tubería p1	148.6	152.40	0.0015
Tubería p2	56.98	152.40	0.0015
Tubería p3	33.05	101.6	0.0015
Tubería p4	37.66	101.6	0.0015
Tubería p5	12.27	101.6	0.0015
Tubería p6	16.39	101.6	0.0015
Tubería p7	38.43	101.6	0.0015
Tubería p8	15.21	101.6	0.0015
Tubería p9	41.95	101.6	0.0015
Tubería p10	52.11	101.6	0.0015
Tubería p11	52.25	101.6	0.0015
Tubería p12	17.36	101.6	0.0015
Tubería p13	10.3	101.6	0.0015
Tubería p14	37.15	101.6	0.0015
Tubería p15	39.84	76.20	0.0015
Tubería p16	8.286	101.6	0.0015
Tubería p17	45.76	50.8	0.0015
Tubería p18	59.73	50.8	0.0015
Tubería p19	48.56	50.8	0.0015
Tubería p20	58.08	101.6	0.0015
Tubería p21	45.51	50.8	0.0015
Tubería p22	58.15	50.8	0.0015
Tubería p23	45.8	50.8	0.0015
Tubería p24	72.56	101.6	0.0015
Tubería p25	44.7	50.8	0.0015
Tubería p26	73.92	50.8	0.0015
Tubería p27	70.3	50.8	0.0015
Tubería p28	46.69	50.8	0.0015
Tubería p29	70.55	76.2	0.0015
Tubería p30	46.8	50.8	0.0015
Tubería p31	70.01	50.8	0.0015
Tubería p32	51.07	50.8	0.0015
Tubería p33	46.88	50.8	0.0015
Tubería p34	49.24	76.2	0.0015
Tubería p35	46.25	50.8	0.0015
Tubería p36	59.12	76.2	0.0015
Tubería p37	21.01	63.5	0.0015
Tubería p38	69.44	50.8	0.0015
Tubería p39	48.67	50.8	0.0015

Tubería p40	55.59	50.8	0.0015
Tubería p41	43.24	50.8	0.0015
Tubería p42	38.09	63.5	0.0015
Tubería p43	33.04	63.5	0.0015
Tubería p44	31.44	63.5	0.0015
Tubería p45	53.98	50.8	0.0015
Tubería p46	113.2	50.8	0.0015
Tubería p47	62.55	50.8	0.0015
Tubería p48	59.72	50.8	0.0015
Tubería p49	17.16	50.8	0.0015
Tubería p50	55.83	50.8	0.0015
Tubería p51	69.17	50.8	0.0015
Tubería p52	71.84	50.8	0.0015
Tubería p53	72.86	50.8	0.0015
Tubería p54	62.39	50.8	0.0015
Tubería p55	88.34	50.8	0.0015
Tubería p56	47.11	50.8	0.0015
Tubería p57	43.75	50.8	0.0015
Tubería p58	63.7	50.8	0.0015
Tubería p59	61.23	50.8	0.0015
Tubería p60	86	50.8	0.0015
Tubería p66	22.28	63.5	0.0015
Tubería p67	33.37	63.5	0.0015
Tubería p68	30.71	63.5	0.0015
Tubería p69	35.79	63.5	0.0015
Tubería p70	41.83	50.8	0.0015
Tubería p71	58.14	50.8	0.0015
Tubería p72	52.87	50.8	0.0015
Tubería p73	73.16	50.8	0.0015
Tubería p74	71.09	50.8	0.0015
Tubería p75	73.85	50.8	0.0015
Tubería p76	72.46	50.8	0.0015
Tubería p77	36.95	50.8	0.0015
Tubería p78	16.26	50.8	0.0015
Tubería p79	56.97	50.8	0.0015
Tubería p80	42.44	50.8	0.0015
Tubería p81	74.34	50.8	0.0015
Tubería p82	16.15	50.8	0.0015
Tubería p83	27.31	50.8	0.0015
Tubería p84	21.76	50.8	0.0015
Tubería p85	30.28	50.8	0.0015
Tubería p86	36.85	50.8	0.0015
Tubería p61	310.62	76.20	0.0015
Tubería 1	2082.80	101.6	0.0015
Tubería 2	8.50	152.40	0.0015
Tubería 3	0.50	152.40	0.0015
Tubería 5	0.5	152.4	0.0015
Válvula 4	No Disponible	152.4	No Disponible
Válvula 6	No Disponible	152.4	No Disponible

Tabla 30 Datos de entrada - Tuberías.  
Fuente: autor.

Además de las dos tablas de entrada, tanto de nudos como de tubería, el otro dato de entrada son los precios totales por diámetro (tabla 22).

### 7.2.1.7. Simulación hidráulica

En las tablas 31 y 32 se relacionan los datos de los cálculos obtenidos una vez corridos los modelos optimizado y no optimizado.

Localidad: San José del Palmar

Modelación según normatividad RAS 2000

Modelación reduciendo diámetros  
Conducción – Red Distribución

Tabla de Red - Nudos

Tabla de Red - Nudos

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión n2	1121.70	0	0.00	1158.52	36.82	0.00	1148.05	26.35
Conexión n3	1115.20	0	0.00	1158.46	43.26	0.00	1143.97	28.77
Conexión n4	1097.65	0.0684	0.07	1158.30	60.65	0.07	1139.64	41.99
Conexión n6	1095.02	0.0760	0.08	1158.13	63.11	0.08	1134.82	39.80
Conexión n7	1092.49	0	0.00	1158.08	65.59	0.00	1133.29	40.80
Conexión n8	1089.10	0.0266	0.03	1158.00	68.90	0.03	1131.24	42.14
Conexión n9	1085.18	0.0152	0.02	1157.90	72.72	0.02	1128.34	43.16
Conexión n10	1079.34	0.0798	0.08	1157.73	78.39	0.08	1123.66	44.32
Conexión n11	1087.50	0.0342	0.03	1157.94	70.44	0.03	1129.35	41.85
Conexión n12	1077.63	0.0874	0.09	1157.55	79.92	0.09	1118.68	41.05
Conexión n13	1115.20	0	0.00	1158.43	43.23	0.00	1140.88	25.68
Conexión n14	1089.10	0	0.00	1158.40	69.30	0.00	1137.79	48.69
Conexión n15	1087.50	0	0.00	1158.39	70.89	0.00	1136.76	49.26
Conexión n16	1085.18	0	0.00	1158.39	73.21	0.00	1136.15	50.97
Conexión n17	1079.34	0	0.00	1158.37	79.03	0.00	1133.95	54.61
Conexión n18	1077.63	0	0.00	1158.28	80.65	0.00	1131.59	53.96
Conexión n19	1075.17	0.0950	0.09	1157.45	82.28	0.09	1116.24	41.07
Conexión n20	1074.38	0.2165	0.22	1157.35	82.97	0.22	1113.38	39.00
Conexión n21	1076.45	0.1216	0.12	1157.40	80.95	0.12	1113.56	37.11
Conexión n22	1075.44	0.0950	0.09	1157.46	82.02	0.09	1116.29	40.85
Conexión n23	1070.09	0.2127	0.21	1157.38	87.29	0.21	1113.56	43.47
Conexión n24	1071.50	0.1482	0.15	1157.25	85.75	0.15	1109.67	38.17
Conexión n25	1062.87	0.2507	0.25	1157.27	94.40	0.25	1110.81	47.94
Conexión n26	1071.22	0.02393	0.02	1157.19	85.97	0.02	1109.44	38.22
Conexión n27	1068.88	0.1444	0.14	1156.80	87.92	0.14	1103.62	34.74
Conexión n28	1067.98	0.2431	0.24	1156.80	88.82	0.24	1103.68	35.70
Conexión n29	1066.98	0.2013	0.20	1156.60	89.62	0.20	1100.95	33.97
Conexión n30	1067.09	0.1026	0.10	1156.51	89.42	0.10	1099.22	32.13
Conexión n32	1066.98	0.0950	0.09	1156.59	89.61	0.09	1100.93	33.95
Conexión n33	1059.91	0.1216	0.12	1156.09	96.18	0.12	1087.47	27.56
Conexión n34	1058.31	0.0418	0.04	1155.78	97.47	0.04	1083.83	25.52
Conexión n35	1069.06	0.1444	0.14	1155.17	86.11	0.14	1080.01	10.94
Conexión n36	1058.17	0.1938	0.19	1154.99	96.82	0.19	1079.07	20.90
Conexión n37	1058.13	0.1862	0.19	1154.97	96.84	0.19	1079.03	20.90

Conexión n38	1069.69	0.0874	0.09	1154.99	85.30	0.09	1079.06	9.37
Conexión n39	1066.18	0.0798	0.08	1155.24	89.06	0.08	1079.83	13.65
Conexión n40	1063.42	0.0684	0.07	1155.43	92.01	0.07	1081.19	17.77
Conexión n41	1060.81	0.0646	0.06	1155.60	94.79	0.06	1082.49	21.68
Conexión n42	1060.81	0	0.00	1157.32	96.51	0.00	1109.90	49.09
Conexión n43	1053.24	0.1216	0.12	1157.27	104.03	0.12	1109.69	56.45
Conexión n44	1041.73	0.2355	0.24	1157.21	115.48	0.24	1109.47	67.74
Conexión n45	1066.18	0.1292	0.13	1155.23	89.05	0.13	1079.78	13.60
Conexión n46	1071.50	0.1520	0.15	1155.14	83.64	0.15	1079.74	8.24
Conexión n47	1069.69	0	0.00	1156.69	87.00	0.00	1105.71	36.02
Conexión n48	1067.45	0.0380	0.04	1156.52	89.07	0.04	1105.05	37.60
Conexión n49	1074.71	0.1140	0.11	1156.00	81.29	0.11	1103.00	28.29
Conexión n50	1082.20	0.1406	0.14	1155.81	73.61	0.14	1102.24	20.04
Conexión n51	1092.21	0.1482	0.15	1155.76	63.55	0.15	1102.03	9.82
Conexión n52	1096.64	0.3001	0.30	1155.74	59.10	0.30	1101.96	5.32
Conexión n53	1099.55	0.1292	0.13	1155.73	56.18	0.13	1101.92	2.37
Conexión n54	1075.90	0.1824	0.18	1154.89	78.99	0.18	1078.67	2.77
Conexión n55	1070.74	0.0988	0.10	1154.87	84.13	0.10	1078.61	7.87
Conexión n56	1070.59	0.0912	0.09	1154.87	84.28	0.09	1078.59	8.00
Conexión n57	1070.59	0.1292	0.13	1154.86	84.27	0.13	1078.55	7.96
Conexión n58	1070.06	0.3799	0.38	1154.88	84.82	0.38	1078.63	8.57
Conexión n69	1059.91	0	0.00	1157.61	97.70	0.00	1113.19	53.28
Conexión n70	1058.31	0	0.00	1157.49	99.18	0.00	1111.87	53.56
Conexión n71	1063.42	0	0.00	1157.22	93.80	0.00	1108.71	45.29
Conexión n72	1066.18	0	0.00	1157.10	90.92	0.00	1107.33	41.15
Conexión n74	1055.09	0.1216	0.12	1156.09	101.00	0.12	1087.43	32.34
Conexión n75	1054.54	0.1026	0.10	1154.97	100.43	0.10	1079.01	24.47
Conexión n76	1054.24	0.1520	0.15	1155.86	101.62	0.15	1102.44	48.20
Conexión n77	1089.06	0.2963	0.30	1155.78	66.72	0.30	1102.14	13.08
Conexión n79	1054.54	0.1178	0.12	1155.04	100.50	0.12	1079.36	24.82
Conexión n80	1070.74	0.3495	0.35	1154.88	84.14	0.35	1078.65	7.91
Conexión n81	1070.56	0.2963	0.30	1154.88	84.32	0.30	1078.65	8.09
Conexión n82	1070.26	0.1520	0.15	1154.91	84.65	0.15	1078.73	8.47
Conexión n83	1070.02	0	0.00	1154.94	84.92	0.00	1078.87	8.85
Conexión 2	1316.74	0	0.00	1165.03	-151.71	0.00	1219.03	-97.71
Conexión 3	1316.74	0	0.00	1317.74	1.00	0.00	1317.73	0.99
Conexión 4	1319.26	0	0.00	1319.26	0.00	0.00	1319.25	-0.01
Conexión 5	1319.26	0	0.00	1317.74	-1.52	0.00	1317.99	-1.27
Embalse 1	1319.26	No Disponible	-4.42	1319.26	0.00	-4.42	1319.26	0.00
Depósito t1	1157.68	No Disponible	-2.88	1158.68	1.00	-2.88	1158.68	1.00
Depósito d1	1316.74	No Disponible	0.00	1317.74	1.00	0.00	1317.74	1.00

Tabla 31 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado  
Fuente: autor.

Localidad: San José del Palmar

Modelación según normatividad RAS 2000

Modelación optimizando diámetros

Tabla de Red - Líneas

Tabla de Red - Líneas

	Longitud	Diámetro	Rugosidad	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.	Factor de fricción	Diámetro	Velocidad	Pérd. Unit.	Factor de fricción
ID Línea	m	mm	mm	LPS	m/s	m/km		mm	m/s	m/km	
Tubería p1	148.6	152.40	0.0015	7.30	0.40	1.07	0.020	63.5	2.31	71.56	0.017
Tubería p2	56.98	152.40	0.0015	7.30	0.40	1.07	0.020	63.5	2.31	71.56	0.017
Tubería p3	33.05	101.6	0.0015	5.63	0.69	4.69	0.019	50.8	2.78	130.94	0.017
Tubería p4	37.66	101.6	0.0015	5.56	0.69	4.59	0.019	50.8	2.74	128.08	0.017
Tubería p5	12.27	101.6	0.0015	5.48	0.68	4.48	0.020	50.8	2.71	124.93	0.017
Tubería p6	16.39	101.6	0.0015	5.48	0.68	4.48	0.020	50.8	2.71	124.93	0.017
Tubería p7	38.43	101.6	0.0015	5.41	0.67	4.37	0.020	50.8	2.67	121.82	0.017
Tubería p8	15.21	101.6	0.0015	5.46	0.67	4.44	0.020	50.8	2.69	123.84	0.017
Tubería p9	41.95	101.6	0.0015	5.33	0.66	4.25	0.020	50.8	2.63	118.60	0.017
Tubería p10	52.11	101.6	0.0015	1.68	0.21	0.55	0.026	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p11	52.25	101.6	0.0015	1.68	0.21	0.55	0.026	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p12	17.36	101.6	0.0015	1.68	0.21	0.55	0.026	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p13	10.3	101.6	0.0015	1.68	0.21	0.55	0.026	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p14	37.15	101.6	0.0015	1.68	0.21	0.55	0.026	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p15	39.84	76.20	0.0015	1.68	0.37	2.16	0.024	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p16	8.286	101.6	0.0015	-5.42	0.67	4.39	0.020	50.8	2.68	122.44	0.017
Tubería p17	45.76	50.8	0.0015	0.57	0.28	2.23	0.028	38.10	1.39	53.45	0.021
Tubería p18	59.73	50.8	0.0015	0.47	0.23	1.62	0.030	38.10	1.30	47.87	0.021
Tubería p19	48.56	50.8	0.0015	-0.32	0.16	0.85	0.033	38.10	0.31	3.85	0.030
Tubería p20	58.08	101.6	0.0015	-4.14	0.51	2.71	0.021	38.10	1.84	88.12	0.020
Tubería p21	45.51	50.8	0.0015	0.54	0.27	2.03	0.029	38.10	1.37	52.51	0.021
Tubería p22	58.15	50.8	0.0015	0.44	0.22	1.45	0.030	38.10	1.29	46.97	0.021
Tubería p23	45.8	50.8	0.0015	-0.22	0.11	0.43	0.037	38.10	0.03	0.07	0.064
Tubería p24	72.56	101.6	0.0015	3.47	0.43	1.99	0.022	38.10	1.39	53.62	0.021
Tubería p25	44.7	50.8	0.0015	-0.20	0.10	0.36	0.038	38.10	0.91	25.40	0.023
Tubería p26	73.92	50.8	0.0015	-0.45	0.22	1.47	0.030	38.10	1.13	37.24	0.022
Tubería p27	70.3	50.8	0.0015	0.58	0.29	2.31	0.028	38.10	1.42	56.04	0.021
Tubería p28	46.69	50.8	0.0015	-0.41	0.20	1.28	0.031	38.10	0.36	5.04	0.029
Tubería p29	70.55	76.2	0.0015	3.11	0.68	6.45	0.021	38.10	1.81	85.87	0.020
Tubería p30	46.8	50.8	0.0015	0.06	0.03	0.04	0.043	38.10	0.17	1.32	0.036
Tubería p31	70.01	50.8	0.0015	-0.97	0.48	5.67	0.025	38.10	1.77	82.29	0.020
Tubería p32	51.07	50.8	0.0015	0.78	0.39	3.91	0.026	38.10	1.39	53.41	0.021
Tubería p33	46.88	50.8	0.0015	0.49	0.24	1.71	0.030	38.10	1.13	36.93	0.022
Tubería p34	49.24	76.2	0.0015	-2.91	0.64	5.72	0.021	38.10	1.85	89.30	0.020
Tubería p35	46.25	50.8	0.0015	0.09	0.05	0.06	0.029	38.10	0.08	0.32	0.034
Tubería p36	59.12	76.2	0.0015	3.29	0.72	7.14	0.021	38.10	2.89	198.72	0.018
Tubería p37	21.01	63.5	0.0015	3.05	0.96	14.90	0.020	38.10	2.67	173.03	0.018
Tubería p38	69.44	50.8	0.0015	1.24	0.61	8.72	0.023	38.10	1.41	55.15	0.021
Tubería p39	48.67	50.8	0.0015	0.20	0.10	0.37	0.038	38.10	0.13	0.83	0.039
Tubería p40	55.59	50.8	0.0015	-0.02	0.01	0.02	0.127	38.10	0.07	0.20	0.030
Tubería p41	43.24	50.8	0.0015	-0.97	0.48	5.69	0.025	38.10	0.75	17.83	0.024
Tubería p42	38.09	63.5	0.0015	-1.64	0.52	4.95	0.023	38.10	1.11	35.80	0.022
Tubería p43	33.04	63.5	0.0015	-1.71	0.54	5.32	0.023	38.10	1.17	39.32	0.022

Tubería p44	31.44	63.5	0.0015	-1.77	0.56	5.68	0.023	38.10	1.22	42.78	0.021
Tubería p45	53.98	50.8	0.0015	0.36	0.18	1.00	0.032	38.10	0.31	3.91	0.030
Tubería p46	113.2	50.8	0.0015	0.24	0.12	0.49	0.036	38.10	0.21	1.90	0.033
Tubería p47	62.55	50.8	0.0015	0.13	0.06	0.14	0.035	38.10	0.11	0.69	0.040
Tubería p48	59.72	50.8	0.0015	0.46	0.23	1.55	0.030	38.10	0.18	1.47	0.035
Tubería p49	17.16	50.8	0.0015	1.32	0.65	9.78	0.023	38.10	1.16	38.66	0.022
Tubería p50	55.83	50.8	0.0015	1.28	0.63	9.29	0.023	38.10	1.12	36.70	0.022
Tubería p51	69.17	50.8	0.0015	0.64	0.32	2.77	0.027	38.10	0.56	10.87	0.026
Tubería p52	71.84	50.8	0.0015	0.31	0.15	0.77	0.034	38.10	0.27	2.97	0.031
Tubería p53	72.86	50.8	0.0015	0.16	0.08	0.24	0.041	38.10	0.14	0.95	0.038
Tubería p54	62.39	50.8	0.0015	0.13	0.06	0.14	0.035	38.10	0.11	0.69	0.040
Tubería p55	88.34	50.8	0.0015	0.38	0.19	1.13	0.032	38.10	0.33	4.33	0.029
Tubería p56	47.11	50.8	0.0015	0.20	0.10	0.37	0.038	38.10	0.17	1.40	0.035
Tubería p57	43.75	50.8	0.0015	0.10	0.05	0.07	0.029	38.10	0.09	0.36	0.036
Tubería p58	63.7	50.8	0.0015	0.13	0.06	0.14	0.035	38.10	0.11	0.68	0.040
Tubería p59	61.23	50.8	0.0015	-0.12	0.06	0.11	0.032	38.10	0.11	0.63	0.041
Tubería p60	86	50.8	0.0015	-0.38	0.19	1.10	0.032	38.10	0.34	4.61	0.029
Tubería p66	22.28	63.5	0.0015	1.68	0.53	5.15	0.023	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p67	33.37	63.5	0.0015	1.68	0.53	5.15	0.023	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería p68	30.71	63.5	0.0015	1.32	0.42	3.38	0.024	38.10	1.16	38.66	0.022
Tubería p69	35.79	63.5	0.0015	1.32	0.42	3.38	0.024	38.10	1.16	38.66	0.022
Tubería p70	41.83	50.8	0.0015	1.32	0.65	9.78	0.023	38.10	1.16	38.66	0.022
Tubería p71	58.14	50.8	0.0015	0.12	0.06	0.12	0.033	38.10	0.11	0.62	0.041
Tubería p72	52.87	50.8	0.0015	0.10	0.05	0.08	0.030	38.10	0.09	0.40	0.037
Tubería p73	73.16	50.8	0.0015	0.52	0.26	1.94	0.029	38.10	0.46	7.60	0.027
Tubería p74	71.09	50.8	0.0015	0.37	0.18	1.07	0.032	38.10	0.33	4.19	0.029
Tubería p75	73.85	50.8	0.0015	0.27	0.13	0.63	0.035	38.10	0.24	2.45	0.032
Tubería p76	72.46	50.8	0.0015	-0.20	0.10	0.36	0.038	38.10	0.17	1.40	0.035
Tubería p77	36.95	50.8	0.0015	0.81	0.40	4.18	0.026	38.10	0.76	18.18	0.024
Tubería p78	16.26	50.8	0.0015	0.51	0.25	1.83	0.029	38.10	0.71	16.34	0.024
Tubería p79	56.97	50.8	0.0015	0.59	0.29	2.36	0.028	38.10	0.57	11.25	0.025
Tubería p80	42.44	50.8	0.0015	0.47	0.23	1.60	0.030	38.10	0.47	7.95	0.027
Tubería p81	74.34	50.8	0.0015	0.44	0.22	1.46	0.030	38.10	0.39	5.64	0.028
Tubería p82	16.15	50.8	0.0015	-0.03	0.01	0.02	0.097	38.10	0.01	0.04	0.124
Tubería p83	27.31	50.8	0.0015	-0.32	0.16	0.85	0.033	38.10	0.27	3.12	0.031
Tubería p84	21.76	50.8	0.0015	-0.48	0.23	1.64	0.030	38.10	0.41	6.19	0.028
Tubería p85	30.28	50.8	0.0015	-0.48	0.23	1.65	0.030	38.10	0.41	6.19	0.028
Tubería p86	36.85	50.8	0.0015	0.12	0.06	0.12	0.033	38.10	0.10	0.49	0.040
Tubería p61	310.62	76.20	0.0015	1.68	0.37	2.16	0.024	38.10	1.47	59.23	0.021
Tubería 1	2082.80	101.6	0.0015	4.42	0.55	3.05	0.020	63.5	1.40	28.97	0.019

Tabla 32 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado.  
Fuente: autor.

En la tabla 33 se presenta un resumen de las modelaciones con el diámetro optimizado comparado con el diámetro de la norma RAS.

Tabla resumen: San José del Palmar

Tramos	Longitud	Diámetro		Velocidad			Presiones			Presión	P trabajo tubería optimizada
		(mm)		(m/s)		vRAS / vOP	(mca)		pOP / pRAS	Estática	
	(m)	Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000		Con F			(mca)	
						Mejorado	RAS 2000				
Tubería p1	148,60	63,5	152,4	2,31	0,40	0,17	26,35	36,82	0,72	36,98	112
Tubería p2	56,98	63,5	152,4	2,31	0,40	0,17	28,77	43,26	0,67	43,48	112
Tubería p3	33,05	50,8	101,6	2,78	0,69	0,25	41,99	60,65	0,69	61,03	112
Tubería p4	37,66	50,8	101,6	2,74	0,69	0,25	39,80	63,11	0,63	63,66	112
Tubería p5	12,27	50,8	101,6	2,71	0,68	0,25	40,80	65,59	0,62	66,19	112
Tubería p6	16,39	50,8	101,6	2,71	0,68	0,25	42,14	68,90	0,61	69,58	112
Tubería p7	38,43	50,8	101,6	2,67	0,67	0,25	44,32	78,39	0,57	79,34	112
Tubería p8	15,21	50,8	101,6	2,69	0,67	0,25	41,85	70,44	0,59	71,18	112
Tubería p9	41,95	50,8	101,6	2,63	0,66	0,25	41,05	79,92	0,51	81,05	112
Tubería p10	52,11	38,1	101,6	1,47	0,21	0,14	25,68	43,23	0,59	43,48	294
Tubería p11	52,25	38,1	101,6	1,47	0,21	0,14	48,69	69,30	0,70	69,58	294
Tubería p12	17,36	38,1	101,6	1,47	0,21	0,14	49,26	70,89	0,69	71,18	294
Tubería p13	10,30	38,1	101,6	1,47	0,21	0,14	50,97	73,21	0,70	73,5	294
Tubería p14	37,15	38,1	101,6	1,47	0,21	0,14	54,61	79,03	0,69	79,34	294
Tubería p15	39,84	38,1	76,2	1,47	0,37	0,25	53,96	80,65	0,67	81,05	294
Tubería p16	8,28	50,8	101,6	2,68	0,67	0,25	41,85	70,44	0,59	71,18	112
Tubería p17	45,76	38,1	50,8	1,39	0,28	0,20	41,07	82,28	0,50	83,51	294
Tubería p18	59,73	38,1	50,8	1,30	0,23	0,18	39,00	82,97	0,47	84,3	294
Tubería p19	48,56	38,1	50,8	0,31	0,16	0,52	37,11	80,95	0,46	82,23	294
Tubería p20	50,08	38,1	101,6	1,84	0,51	0,28	41,05	79,92	0,51	81,05	294
Tubería p21	45,51	38,1	50,8	1,37	0,27	0,20	40,85	82,02	0,50	83,24	294
Tubería p22	58,15	38,1	50,8	1,29	0,22	0,17	43,47	87,29	0,50	88,59	294
Tubería p23	45,80	38,1	50,8	0,03	0,11	3,67	37,11	80,95	0,46	82,23	294
Tubería p24	72,56	38,1	101,6	1,39	0,43	0,31	38,17	85,75	0,45	87,18	294
Tubería p25	44,70	38,1	50,8	0,91	0,10	0,11	47,94	94,40	0,51	95,81	294
Tubería p26	73,92	38,1	50,8	1,13	0,22	0,19	43,47	87,29	0,50	88,59	294
Tubería p27	70,30	38,1	50,8	1,42	0,29	0,20	38,22	85,97	0,44	87,46	294
Tubería p28	46,69	38,1	50,8	0,36	0,20	0,56	38,17	85,75	0,45	87,18	294
Tubería p29	70,55	38,1	76,2	1,81	0,68	0,38	34,74	87,92	0,40	89,8	294
Tubería p30	46,80	38,1	50,8	0,17	0,03	0,18	35,70	88,82	0,40	90,7	294
Tubería p31	70,01	38,1	50,8	1,77	0,48	0,27	38,22	85,97	0,44	87,46	294
Tubería p32	51,07	38,1	50,8	1,39	0,39	0,28	33,97	89,62	0,38	91,7	294
Tubería p33	46,88	38,1	50,8	1,13	0,24	0,21	32,13	89,42	0,36	91,59	294
Tubería p34	49,24	38,1	76,2	1,85	0,64	0,35	34,74	87,92	0,40	89,8	294
Tubería p35	46,25	38,1	50,8	0,08	0,05	0,63	33,95	89,61	0,38	91,7	294
Tubería p36	59,12	38,1	76,2	2,89	0,72	0,25	27,56	96,18	0,29	98,77	294
Tubería p37	21,01	38,1	63,5	2,67	0,96	0,36	25,52	97,47	0,26	100,37	294
Tubería p38	69,44	38,1	50,8	1,41	0,61	0,43	10,95	86,11	0,13	89,62	294
Tubería p39	48,67	38,1	50,8	0,13	0,10	0,77	20,90	96,84	0,22	100,55	294
Tubería p40	55,59	38,1	50,8	0,07	0,01	0,14	9,37	85,30	0,11	88,99	294
Tubería p41	43,24	38,1	50,8	0,75	0,48	0,64	13,65	89,06	0,15	92,5	294
Tubería p42	38,09	38,1	63,5	1,11	0,52	0,47	17,77	92,01	0,19	95,26	294

Tubería p43	33,04	38,1	63,5	1,17	0,54	0,46	21,68	94,79	0,23	97,87	294
Tubería p44	31,44	38,1	63,5	1,22	0,56	0,46	25,52	97,47	0,26	100,37	294
Tubería p45	53,98	38,1	50,8	0,31	0,18	0,58	56,45	104,03	0,54	105,44	294
Tubería p46	113,20	38,1	50,8	0,21	0,12	0,57	67,74	115,48	0,59	116,95	294
Tubería p47	62,55	38,1	50,8	0,11	0,06	0,55	13,60	89,05	0,15	92,5	294
Tubería p48	59,72	38,1	50,8	0,18	0,23	1,28	8,24	83,64	0,10	87,18	294
Tubería p49	17,16	38,1	50,8	1,16	0,65	0,56	37,60	89,07	0,42	91,23	294
Tubería p50	55,83	38,1	50,8	1,12	0,63	0,56	28,29	81,29	0,35	83,97	294
Tubería p51	69,17	38,1	50,8	0,56	0,32	0,57	20,04	73,61	0,27	76,48	294
Tubería p52	71,84	38,1	50,8	0,27	0,15	0,56	9,82	63,55	0,15	66,47	294
Tubería p53	72,86	38,1	50,8	0,14	0,08	0,57	5,32	59,10	0,09	62,04	294
Tubería p54	62,39	38,1	50,8	0,11	0,06	0,55	2,37	56,18	0,04	59,13	294
Tubería p55	88,34	38,1	50,8	0,33	0,19	0,58	2,77	78,99	0,04	82,78	294
Tubería p56	47,11	38,1	50,8	0,17	0,10	0,59	7,87	84,13	0,09	87,94	294
Tubería p57	43,75	38,1	50,8	0,09	0,05	0,56	8,00	84,28	0,09	88,09	294
Tubería p58	63,70	38,1	50,8	0,11	0,06	0,55	7,96	84,27	0,09	88,09	294
Tubería p59	61,23	38,1	50,8	0,11	0,06	0,55	8,57	84,49	0,10	88,62	294
Tubería p60	86,00	38,1	50,8	0,34	0,19	0,56	20,90	96,84	0,22	100,55	294
Tubería p66	22,28	38,1	63,5	1,47	0,53	0,36	53,56	99,18	0,54	100,37	294
Tubería p67	33,37	38,1	63,5	1,47	0,53	0,36	49,09	96,51	0,51	97,87	294
Tubería p68	30,71	38,1	63,5	1,16	0,42	0,36	45,29	93,80	0,48	95,26	294
Tubería p69	35,79	38,1	63,5	1,16	0,42	0,36	41,15	90,92	0,45	92,5	294
Tubería p70	41,83	38,1	50,8	1,16	0,65	0,56	36,02	87,00	0,41	88,99	294
Tubería p71	58,14	38,1	50,8	0,11	0,06	0,55	32,34	101,00	0,32	103,59	294
Tubería p72	52,87	38,1	50,8	0,09	0,05	0,56	24,47	100,43	0,24	104,14	294
Tubería p73	73,16	38,1	50,8	0,46	0,26	0,57	48,20	101,62	0,47	104,44	294
Tubería p74	71,09	38,1	50,8	0,33	0,18	0,55	13,08	66,72	0,20	69,62	294
Tubería p75	73,85	38,1	50,8	0,24	0,13	0,54	5,32	59,10	0,09	62,04	294
Tubería p76	72,46	38,1	50,8	0,17	0,10	0,59	20,04	73,61	0,27	76,48	294
Tubería p77	36,95	38,1	50,8	0,76	0,40	0,53	20,90	96,82	0,22	100,51	294
Tubería p78	16,26	38,1	50,8	0,71	0,25	0,35	8,24	83,64	0,10	87,18	294
Tubería p79	56,97	38,1	50,8	0,57	0,29	0,51	24,82	100,50	0,25	104,14	294
Tubería p80	42,44	38,1	50,8	0,47	0,23	0,49	20,90	96,84	0,22	100,55	294
Tubería p81	74,34	38,1	50,8	0,39	0,22	0,56	7,91	84,14	0,09	87,94	294
Tubería p82	16,15	38,1	50,8	0,01	0,01	1,00	8,12	84,35	0,10	88,15	294
Tubería p83	27,31	38,1	50,8	0,27	0,16	0,59	8,47	84,65	0,10	88,42	294
Tubería p84	21,76	38,1	50,8	0,41	0,23	0,56	8,85	84,92	0,10	88,66	294
Tubería p85	30,28	38,1	50,8	0,41	0,23	0,56	9,37	85,30	0,11	88,99	294
Tubería p86	36,85	38,1	50,8	0,10	0,06	0,60	8,57	84,82	0,10	88,62	294
Tubería p61	310,62	38,1	76,2	1,47	0,37	0,25	53,28	97,70	0,55	98,77	294
Tubería 1	2.082,80	63,5	101,6	1,40	0,55	0,39	99,71	153,70	0,65	160,06	112

Tabla 33 Comparación de resultados diámetro optimizado vs diámetro RAS.

Fuente: autor.

En la tabla 34 se presenta la comparación de precios de tubería, calculado con el diámetro optimizado y el diámetro de la norma RAS.

Tramos	Longitud	Costos			
		(\$/ml)		Totales	
	(m)	Con F		Con F	
		Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000
Tubería p1	148,60	\$18.065	\$50.917	\$2.684.459	\$7.566.266
Tubería p2	56,98	\$18.065	\$50.917	\$1.029.344	\$2.901.251
Tubería p3	33,05	\$14.846	\$32.346	\$490.660	\$1.069.035
Tubería p4	37,66	\$14.846	\$32.346	\$559.100	\$1.218.150
Tubería p5	12,27	\$14.846	\$32.346	\$182.160	\$396.885
Tubería p6	16,39	\$14.846	\$32.346	\$243.326	\$530.151
Tubería p7	38,43	\$14.846	\$32.346	\$570.532	\$1.243.057
Tubería p8	15,21	\$14.846	\$32.346	\$225.808	\$491.983
Tubería p9	41,95	\$14.846	\$32.346	\$622.790	\$1.356.915
Tubería p10	52,11	\$12.155	\$32.346	\$633.397	\$1.685.550
Tubería p11	52,25	\$12.155	\$32.346	\$635.099	\$1.690.079
Tubería p12	17,36	\$12.155	\$32.346	\$211.011	\$561.527
Tubería p13	10,30	\$12.155	\$32.346	\$125.197	\$333.164
Tubería p14	37,15	\$12.155	\$32.346	\$451.558	\$1.201.654
Tubería p15	39,84	\$12.155	\$22.252	\$484.255	\$886.520
Tubería p16	8,28	\$14.846	\$32.346	\$122.925	\$267.825
Tubería p17	45,76	\$12.155	\$14.846	\$556.213	\$679.353
Tubería p18	59,73	\$12.155	\$14.846	\$726.018	\$886.752
Tubería p19	48,56	\$12.155	\$14.846	\$590.247	\$720.922
Tubería p20	50,08	\$12.155	\$32.346	\$608.722	\$1.619.888
Tubería p21	45,51	\$12.155	\$14.846	\$553.174	\$675.641
Tubería p22	58,15	\$12.155	\$14.846	\$706.813	\$863.295
Tubería p23	45,80	\$12.155	\$14.846	\$556.699	\$679.947
Tubería p24	72,56	\$12.155	\$32.346	\$881.967	\$2.347.026
Tubería p25	44,70	\$12.155	\$14.846	\$543.329	\$663.616
Tubería p26	73,92	\$12.155	\$14.846	\$898.498	\$1.097.416
Tubería p27	70,30	\$12.155	\$14.846	\$854.497	\$1.043.674
Tubería p28	46,69	\$12.155	\$14.846	\$567.517	\$693.160
Tubería p29	70,55	\$12.155	\$22.252	\$857.535	\$1.569.879
Tubería p30	46,80	\$12.155	\$14.846	\$568.854	\$694.793
Tubería p31	70,01	\$12.155	\$14.846	\$850.972	\$1.039.368
Tubería p32	51,07	\$12.155	\$14.846	\$620.756	\$758.185
Tubería p33	46,88	\$12.155	\$14.846	\$569.826	\$695.980
Tubería p34	49,24	\$12.155	\$22.252	\$598.512	\$1.095.688
Tubería p35	46,25	\$12.155	\$14.846	\$562.169	\$686.628
Tubería p36	59,12	\$12.155	\$22.252	\$718.604	\$1.315.538
Tubería p37	21,01	\$12.155	\$18.065	\$255.377	\$379.546

Tubería p38	69,44	\$12.155	\$14.846	\$844.043	\$1.030.906
Tubería p39	48,67	\$12.155	\$14.846	\$591.584	\$722.555
Tubería p40	55,59	\$12.155	\$14.846	\$675.696	\$825.289
Tubería p41	43,24	\$12.155	\$14.846	\$525.582	\$641.941
Tubería p42	38,09	\$12.155	\$18.065	\$462.984	\$688.096
Tubería p43	33,04	\$12.155	\$18.065	\$401.601	\$596.868
Tubería p44	31,44	\$12.155	\$18.065	\$382.153	\$567.964
Tubería p45	53,98	\$12.155	\$14.846	\$656.127	\$801.387
Tubería p46	113,20	\$12.155	\$14.846	\$1.375.946	\$1.680.567
Tubería p47	62,55	\$12.155	\$14.846	\$760.295	\$928.617
Tubería p48	59,72	\$12.155	\$14.846	\$725.897	\$886.603
Tubería p49	17,16	\$12.155	\$14.846	\$208.580	\$254.757
Tubería p50	55,83	\$12.155	\$14.846	\$678.614	\$828.852
Tubería p51	69,17	\$12.155	\$14.846	\$840.761	\$1.026.898
Tubería p52	71,84	\$12.155	\$14.846	\$873.215	\$1.066.537
Tubería p53	72,86	\$12.155	\$14.846	\$885.613	\$1.081.680
Tubería p54	62,39	\$12.155	\$14.846	\$758.350	\$926.242
Tubería p55	88,34	\$12.155	\$14.846	\$1.073.773	\$1.311.496
Tubería p56	47,11	\$12.155	\$14.846	\$572.622	\$699.395
Tubería p57	43,75	\$12.155	\$14.846	\$531.781	\$649.513
Tubería p58	63,70	\$12.155	\$14.846	\$774.274	\$945.690
Tubería p59	61,23	\$12.155	\$14.846	\$744.251	\$909.021
Tubería p60	86,00	\$12.155	\$14.846	\$1.045.330	\$1.276.756
Tubería p66	22,28	\$12.155	\$18.065	\$270.813	\$402.488
Tubería p67	33,37	\$12.155	\$18.065	\$405.612	\$602.829
Tubería p68	30,71	\$12.155	\$18.065	\$373.280	\$554.776
Tubería p69	35,79	\$12.155	\$18.065	\$435.027	\$646.546
Tubería p70	41,83	\$12.155	\$14.846	\$508.444	\$621.008
Tubería p71	58,14	\$12.155	\$14.846	\$706.692	\$863.146
Tubería p72	52,87	\$12.155	\$14.846	\$642.635	\$784.908
Tubería p73	73,16	\$12.155	\$14.846	\$889.260	\$1.086.133
Tubería p74	71,09	\$12.155	\$14.846	\$864.099	\$1.055.402
Tubería p75	73,85	\$12.155	\$14.846	\$897.647	\$1.096.377
Tubería p76	72,46	\$12.155	\$14.846	\$880.751	\$1.075.741
Tubería p77	36,95	\$12.155	\$14.846	\$449.127	\$548.560
Tubería p78	16,26	\$12.155	\$14.846	\$197.640	\$241.396
Tubería p79	56,97	\$12.155	\$14.846	\$692.470	\$845.777
Tubería p80	42,44	\$12.155	\$14.846	\$515.858	\$630.064
Tubería p81	74,34	\$12.155	\$14.846	\$903.603	\$1.103.652
Tubería p82	16,15	\$12.155	\$14.846	\$196.303	\$239.763
Tubería p83	27,31	\$12.155	\$14.846	\$331.953	\$405.444
Tubería p84	21,76	\$12.155	\$14.846	\$264.493	\$323.049
Tubería p85	30,28	\$12.155	\$14.846	\$368.053	\$449.537
Tubería p86	36,85	\$12.155	\$14.846	\$447.912	\$547.075

Tubería p61	310,62	\$12.155	\$22.252	\$3.775.586	\$6.911.916
Tubería 1	2.082,80	\$18.065	\$32.346	\$37.625.782	\$67.370.249
TOTAL				\$91.950.032	\$152.359.773

Tabla 34 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con norma RAS.

Fuente: autor.

## 7.2.2. Pachavita

### 7.2.2.1. Generalidades<sup>69</sup>

El municipio de Pachavita se ubica al suroccidente del departamento de Boyacá, provincia de Neira, sobre la cordillera Oriental, al borde del río Garagoa. Su cabecera municipal está a una altura de 1.985 msnm. Coordenadas: 5°09'00" de latitud norte y 73°24'15" de longitud oeste. Su extensión aproximada es de 68 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el municipio de Chinavita, al sur con los municipios de Tenza y La Capilla, al este con Garagoa y al oeste con Úmbita. En la ilustración 19<sup>70</sup> se ubica el municipio de Pachavita en el departamento de Boyacá.

### 7.2.2.2. Descripción del sistema de acueducto<sup>71</sup>

El sistema de acueducto de Pachavita se compone de los siguientes elementos:

Captación: bocatoma de fondo en la quebrada La Chapa.

Aducción bocatoma - desarenador: en tubería PVC de 3", con una longitud de 20 m, aproximadamente.

Desarenador: estructura en concreto, de flujo horizontal, con dimensiones aproximadas de 4 x 0,75 m y una profundidad de 1 m.

Conducción desarenador - planta de tratamiento: en tubería PVC de 3", con una longitud aproximada de 1.675 m.

Planta de tratamiento: consta de una torre de aireación, filtro grueso ascendente de grava, filtro lento descendente de arena, cámara de cloración y edificio de laboratorio.

<sup>69</sup> [http://www.pachavita-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.pachavita-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml).

<sup>70</sup> [http://geoportal.igac.gov.co/mapas\\_de\\_colombia/igac/politicos\\_admin\\_2014/Boyaca.pdf](http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/igac/politicos_admin_2014/Boyaca.pdf).

<sup>71</sup> Formulación y elaboración de los planes maestros de acueducto y alcantarillado de los seis (6) grupos conformados por veintinueve (29) municipios del departamento de Boyacá, Grupo a, consorcio Inalcom-ILAM-CRA, septiembre de 2011.



### 7.2.2.3.1. Población y proyección de la población

Como se indicó, se consultaron los censos entre 1973 y 2005, con estos datos se proyectó la población hasta el periodo de diseño. La información se relaciona en la tabla 35

#### Datos censos DANE, Pachavita

Año	Año censado				Actual
	1973	1985	1993	2005	2015
Cabecera (habitantes)	343	385	647	451	401

Tabla 35 Población censada<sup>72</sup> y población actual<sup>73</sup> (Pachavita).

Con los datos de la tabla 35 se hicieron las proyecciones aritmética, geométrica y exponencial, cuyos resultados aparecen en la tabla 36

POBLACION PROYECTADA (habitantes)				
Año	Aritmética	Geométrica	Exponencial	Promedio
2015	401	401	401	401
2020	420	419	418	419
2025	438	438	435	437
2030	457	458	453	456
2035	476	478	472	475
2040	494	500	492	495

Tabla 36 Proyección de población para el municipio de Pachavita.

Fuente: autor.

Los cálculos anteriores se reflejan en el gráfico 5, donde también se incluye la población censada.

Como se puede observar, las proyecciones realizadas a través de los tres métodos arrojaron resultados muy similares, por lo cual se sacó un promedio de los tres métodos, que fue la población que se adoptó al final para el diseño.

### 7.2.2.3.2. Nivel de complejidad del sistema

Como la población es menor de 2.500 habitantes al final del periodo de diseño, el municipio es de categoría 6<sup>74</sup> y su nivel de complejidad bajo.

<sup>72</sup> Fuente DANE.

<sup>73</sup> <http://www.pachavita-boyaca.gov.co/indicadores.shtml>.

<sup>74</sup> [http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPyKssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIkEKcABHA0L6\\_Tzyc1P1C3IjygHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T1I1VUZVUzI1UTIwQUU3R083MUwxM0gw/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04_Sj9CPyKssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIkEKcABHA0L6_Tzyc1P1C3IjygHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T1I1VUZVUzI1UTIwQUU3R083MUwxM0gw/).

### 7.2.2.3.3. Caudal de diseño

Dotación	90 L/hab día
Pérdidas técnicas	25%
Dotación corregida	120 L/hab día

#### Doméstico

Caudal Medio Diario (Qmd)	0,69 L/s
Factor K1	1,30
Caudal Máximo Diario (QMD)	0,90 L/s
Factor K2	1,50
Caudal Máximo Horario (QMH)	1,35 L/s

Caudal comercial, Institucional 4.812,00 L/día Asumimos 10% del Qmd

### CURVA DE POBLACIÓN ACTUAL Y FUTURA (PACHAVITA)

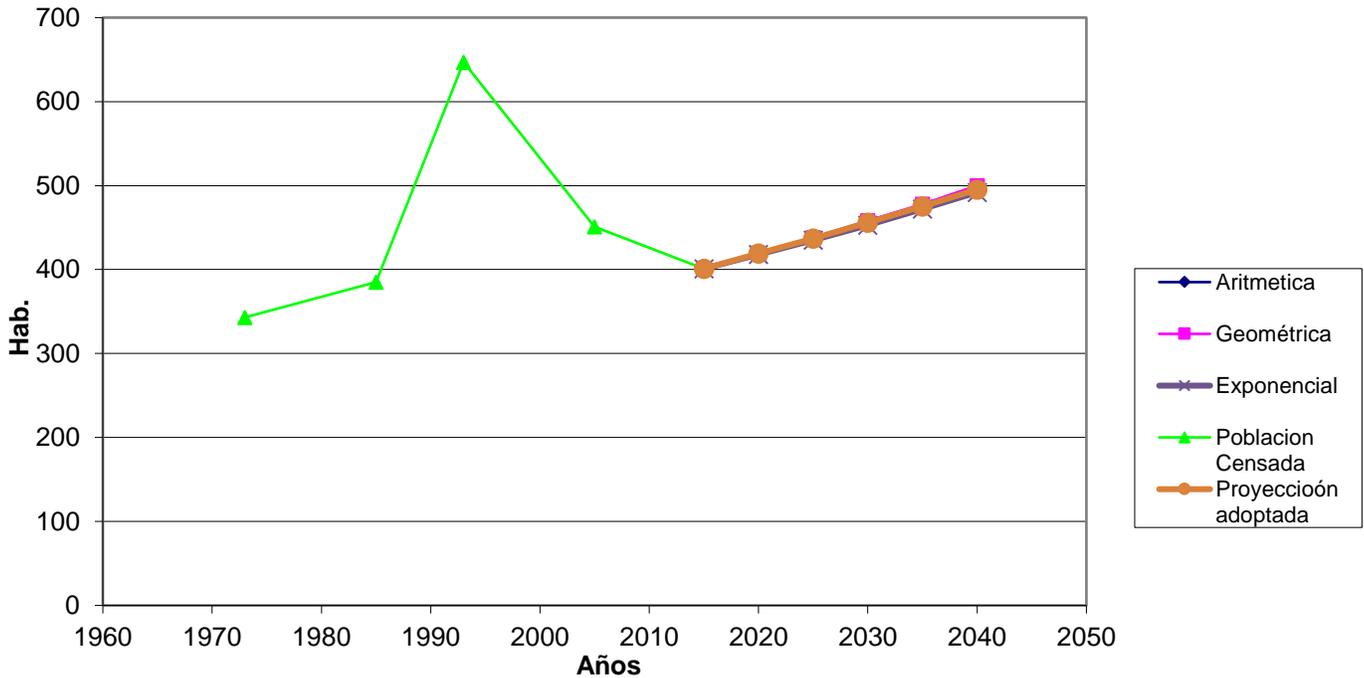


Gráfico 6 Población actual y futura (Pachavita).

Fuente: autor.

Con estos datos se determinó el caudal de diseño para periodos de cinco años hasta el periodo final, los resultados se resumen en la tabla 37.

Tabla 37 Caudales de diseño en periodos de cinco años

Fuente: autor.

Demanda de agua				
AÑO	Población (Hab)	Qmd (L/s)	QMD (L/s)	QMH (L/s)
2015	401	0,61	0,79	1,19
2020	419	0,64	0,83	1,25

2025	437	0,66	0,86	1,29
2030	456	0,69	0,90	1,35
2035	475	0,72	0,94	1,41
2040	495	0,74	0,96	1,44

#### 7.2.2.4. Modelación del sistema

La modelación del sistema se realizó con el programa Epanet Brasil, que contiene un módulo adicional de optimización de costos, lo cual facilita el análisis económico. Para este cálculo, los precios determinados en la tabla 22 se introducen al modelo y se corre el módulo de optimización.

En el caso del análisis de las redes de distribución, los caudales en los nodos se determinaron por el método caudal por metro lineal de tubería, que consiste en dividir el caudal de diseño de la red entre la longitud total de la tubería de la red, y el cociente se multiplica por la longitud de cada tramo.

Primero, se hizo la modelación con los diámetros mínimos indicados en la normatividad y, luego, se modeló con la opción optimización, donde es posible que el cálculo contemple diámetros menores a los exigidos por la normatividad.

Una vez realizadas las dos opciones de cálculos se hicieron las comparaciones técnica y económica.

#### 7.2.2.5. Esquema de la red

El esquema extraído del Epanet Brasil se muestra en la Ilustración 20, donde se encuentra la conducción tanque - red de distribución y la red de distribución.

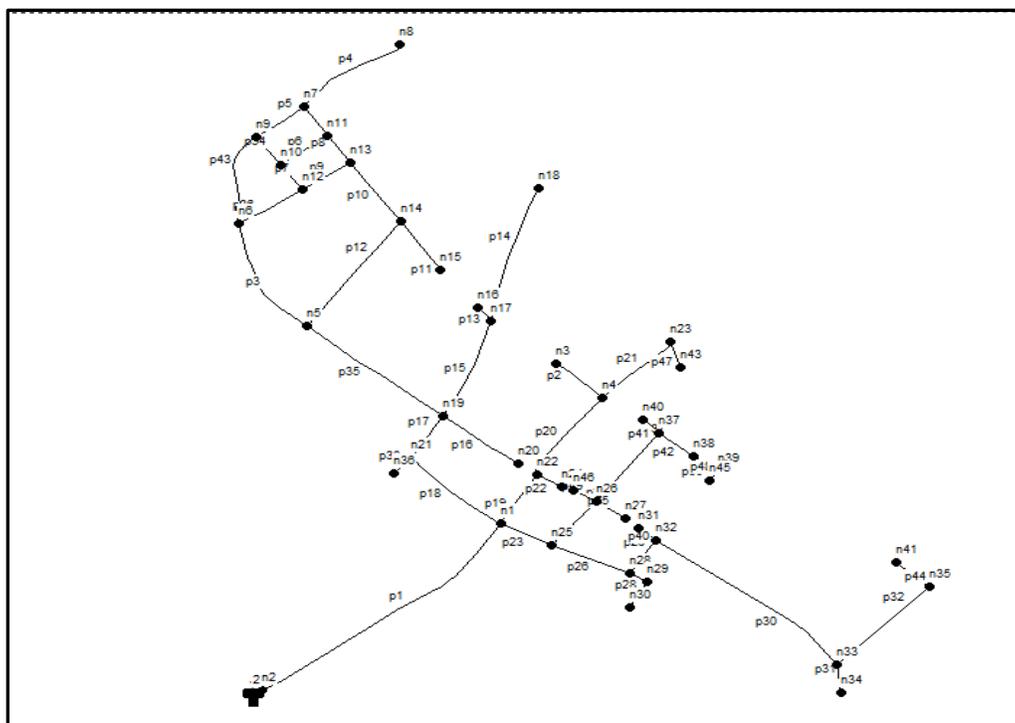


Ilustración 20 Conducción tanque red - red de distribución, municipio de Pachavita  
Fuente: autor.

7.2.2.6. Tablas de entrada nudos y tubería.

Localidad: Pachavita

Tabla de Red - Nudos

	Cota	Demanda	Altura
ID Nudo	m	LPS	m
Conexión n1	1988.9	0.16	2029.63
Conexión n2	2026.2	0.00	2030.46
Conexión n3	1981.1	0.11	2029.55
Conexión n4	1982.2	0.07	2029.55
Conexión n5	1983.2	0.18	2028.61
Conexión n6	1988.2	0.07	2028.56
Conexión n7	1988.8	0.04	2028.56
Conexión n8	1987.9	0.02	2028.56
Conexión n9	1989.9	0.04	2028.56
Conexión n10	1986.8	0.03	2028.56
Conexión n11	1987.2	0.03	2028.56
Conexión n12	1985.8	0.06	2028.56
Conexión n13	1985.9	0.04	2028.56
Conexión n14	1982.5	0.08	2028.56
Conexión n15	1979.8	0.08	2028.56
Conexión n16	1979.6	0.07	2028.86
Conexión n17	1979.4	0.08	2028.86
Conexión n18	1974.9	0.08	2028.86
Conexión n19	1984.9	0.12	2028.90
Conexión n20	1986	0.06	2028.89
Conexión n21	1989.4	0.05	2029.12
Conexión n22	1985.8	0.02	2029.60
Conexión n23	1978.3	0.08	2029.55
Conexión n24	1985.6	0.02	2029.60
Conexión n25	1988.2	0.08	2029.40
Conexión n26	1985.8	0.03	2029.33
Conexión n27	1986.1	0.03	2029.33
Conexión n28	1989.6	0.03	2029.31
Conexión n29	1992.5	0.04	2029.31
Conexión n30	1997.7	0.01	2029.31
Conexión n31	1986.5	0.02	2029.27
Conexión n32	1986.5	0.16	2029.27
Conexión n33	1996.1	0.10	2029.19
Conexión n34	1996.1	0.01	2029.19
Conexión n35	1986.5	0.03	2029.17
Conexión n36	1992.5	0.03	2029.12
Conexión n37	1981.6	0.08	2029.25
Conexión n38	1982.2	0.06	2029.23
Conexión n39	1982.7	0.10	2029.22

Conexión n40	1981.4	0.04	2029.25
Conexión n41	1984.1	0.13	2029.17
Conexión n43	1975.3	0.03	2029.55
Conexión n45	1983	0.17	2029.22
Conexión n46	1985.5	0.03	2029.33
Depósito 2	2029.5	-2.83	2030.49

*Tabla 38 Datos de entrada – Nudos  
Fuente: autor.*

Localidad: Pachavita

Tabla de Red - Líneas en 6:00 Hrs

	Longitud	Diámetro	Rugosidad
ID Línea	m	mm	mm
Tubería p1	234.71	83,42	0.0012
Tubería p2	46.22	54,58	0.0012
Tubería p3	108.9	54,58	0.0012
Tubería p4	93.33	54,58	0.0012
Tubería p5	45.03	54,58	0.0012
Tubería p6	43.1	54,58	0.0012
Tubería p7	26.66	54,58	0.0012
Tubería p8	61.1	54,58	0.0012
Tubería p9	43.11	54,58	0.0012
Tubería p10	63.99	54,58	0.0012
Tubería p11	54.23	54,58	0.0012
Tubería p12	116.2	54,58	0.0012
Tubería p13	16.47	54,58	0.0012
Tubería p14	124	54,58	0.0012
Tubería p15	91.83	54,58	0.0012
Tubería p16	70.56	54,58	0.0012
Tubería p17	44.3	54,58	0.0012
Tubería p18	88.52	54,58	0.0012
Tubería p19	50.69	54,58	0.0012
Tubería p20	86.15	54,58	0.0012
Tubería p21	72.72	54,58	0.0012
Tubería p22	21.25	54,58	0.0012
Tubería p23	42.99	54,58	0.0012
Tubería p24	51.74	54,58	0.0012
Tubería p25	25.87	54,58	0.0012
Tubería p26	62.98	54,58	0.0012
Tubería p27	15.45	54,58	0.0012
Tubería p28	26.24	54,58	0.0012
Tubería p29	16.5	54,58	0.0012
Tubería p30	175.5	54,58	0.0012
Tubería p31	25.51	54,58	0.0012
Tubería p32	97.75	54,58	0.0012
Tubería p33	18.68	54,58	0.0012
Tubería p34	31.81	54,58	0.0012
Tubería p35	129.4	54,58	0.0012
Tubería p36	55.98	54,58	0.0012

Tubería p37	75.35	54,58	0.0012
Tubería p39	22.05	54,58	0.0012
Tubería p40	34.47	54,58	0.0012
Tubería p41	18.84	54,58	0.0012
Tubería p42	33.56	54,58	0.0012
Tubería p43	85.67	54,58	0.0012
Tubería p44	33.19	54,58	0.0012
Tubería p47	29.96	54,58	0.0012
Tubería p48	10.52	54,58	0.0012
Tubería p49	20.14	54,58	0.0012
Tubería 1	9.25	83,42	0.0012

Tabla 39 Datos de entrada – Tuberías

Fuente: autor.

### 7.2.2.7. Simulación hidráulica

En las tablas 40 y 41 se relacionan los datos de los cálculos obtenidos una vez corridos los modelos optimizado y no optimizado.

Localidad: Pachavita

Modelación según normatividad RAS 2000

Tabla de Red - Nudos en 6:00 Hrs

Modelación reduciendo diámetros

Tabla de Red - Nudos en 0:00 Hrs

ID Nudo	Cota m	Demanda base LPS	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión n1	1988.9	0.163777154	0.16	2029.63	40.73	0.16	2021.25	32.35
Conexión n2	2026.2	0	0.00	2030.46	4.26	0.00	2030.15	3.95
Conexión n3	1981.1	0.111306125	0.11	2029.55	48.45	0.11	2020.80	39.70
Conexión n4	1982.2	0.072294147	0.07	2029.55	47.35	0.07	2020.82	38.62
Conexión n5	1983.2	0.179706632	0.18	2028.61	45.41	0.18	2015.57	32.37
Conexión n6	1988.2	0.074559133	0.07	2028.56	40.36	0.07	2015.33	27.13
Conexión n7	1988.8	0.040147227	0.04	2028.56	39.76	0.04	2015.31	26.51
Conexión n8	1987.9	0.022941275	0.02	2028.56	40.66	0.02	2015.30	27.40
Conexión n9	1989.9	0.042058997	0.04	2028.56	38.66	0.04	2015.31	25.41
Conexión n10	1986.8	0.030588366	0.03	2028.56	41.76	0.03	2015.31	28.51
Conexión n11	1987.2	0.028676584	0.03	2028.56	41.36	0.03	2015.30	28.10
Conexión n12	1985.8	0.05926495	0.06	2028.56	42.76	0.06	2015.31	29.51
Conexión n13	1985.9	0.043970767	0.04	2028.56	42.66	0.04	2015.31	29.41
Conexión n14	1982.5	0.084117994	0.08	2028.56	46.06	0.08	2015.32	32.82
Conexión n15	1979.8	0.084117994	0.08	2028.56	48.76	0.08	2015.31	35.51
Conexión n16	1979.6	0.070735594	0.07	2028.86	49.26	0.07	2016.99	37.39
Conexión n17	1979.4	0.080294455	0.08	2028.86	49.46	0.08	2017.00	37.60
Conexión n18	1974.9	0.080294455	0.08	2028.86	53.96	0.08	2016.97	42.07
Conexión n19	1984.9	0.122353452	0.12	2028.90	44.00	0.12	2017.17	32.27
Conexión n20	1986	0.06117672	0.06	2028.89	42.89	0.06	2017.16	31.16
Conexión n21	1989.4	0.047794319	0.05	2029.12	39.72	0.05	2018.42	29.02
Conexión n22	1985.8	0.024853044	0.02	2029.60	43.80	0.02	2021.06	35.26
Conexión n23	1978.3	0.084117994	0.08	2029.55	51.25	0.08	2020.78	42.48
Conexión n24	1985.6	0.019117722	0.02	2029.60	44.00	0.02	2021.06	35.46
Conexión n25	1988.2	0.077207809	0.08	2029.40	41.20	0.08	2019.97	31.77

Conexión n26	1985.8	0.028676584	0.03	2029.33	43.53	0.03	2019.56	33.76
Conexión n27	1986.1	0.026764814	0.03	2029.33	43.23	0.03	2019.56	33.46
Conexión n28	1989.6	0.028676584	0.03	2029.31	39.71	0.03	2019.48	29.88
Conexión n29	1992.5	0.036323675	0.04	2029.31	36.81	0.04	2019.47	26.97
Conexión n30	1997.7	0.011470631	0.01	2029.31	31.61	0.01	2019.47	21.77
Conexión n31	1986.5	0.017205953	0.02	2029.27	42.77	0.02	2019.27	32.77
Conexión n32	1986.5	0.159942974	0.16	2029.27	42.77	0.16	2019.27	32.77
Conexión n33	1996.1	0.099412177	0.10	2029.19	33.09	0.10	2018.83	22.73
Conexión n34	1996.1	0.013382413	0.01	2029.19	33.09	0.01	2018.83	22.73
Conexión n35	1986.5	0.034411906	0.03	2029.17	42.67	0.03	2018.73	32.23
Conexión n36	1992.5	0.032500136	0.03	2029.12	36.62	0.03	2018.42	25.92
Conexión n37	1981.6	0.080162293	0.08	2029.25	47.65	0.08	2019.13	37.53
Conexión n38	1982.2	0.063409951	0.06	2029.23	47.03	0.06	2019.02	36.82
Conexión n39	1982.7	0.095194692	0.10	2029.22	46.52	0.10	2018.97	36.27
Conexión n40	1981.4	0.036171181	0.04	2029.25	47.85	0.04	2019.13	37.73
Conexión n41	1984.1	0.130000543	0.13	2029.17	45.07	0.13	2018.71	34.61
Conexión n43	1975.3	0.028676584	0.03	2029.55	54.25	0.03	2020.78	45.48
Conexión n45	1983	0.170173654	0.17	2029.22	46.22	0.17	2018.96	35.96
Conexión n46	1985.5	0.030123859	0.03	2029.33	43.83	0.03	2019.56	34.06
Depósito 2	2029.5	No Disponible	-2.83	2030.49	0.99	-2.83	2030.50	1.00

Tabla 40 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado.

Fuente: autor.

Localidad: Pachavita

Modelación según normatividad RAS 2000

Tabla de Red - Líneas

Modelación reduciendo diámetros

Tabla de Red - Líneas en 0:00 Hrs

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. m/km	Factor de	Diámetro mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. m/km	Factor de
Tubería p1	234.71	83,42	0.0012	-2.83	0.52	3.54	0.022	50,80	-2.83	1.40	37.93	0.019
Tubería p2	46.22	54,58	0.0012	-0.11	0.05	0.06	0.030	38,10	-0.11	0.10	0.51	0.040
Tubería p3	108.9	54,58	0.0012	0.26	0.11	0.41	0.036	38,10	0.26	0.23	2.24	0.033
Tubería p4	93.33	54,58	0.0012	0.02	0.01	0.01	0.124	38,10	0.02	0.02	0.05	0.085
Tubería p5	45.03	54,58	0.0012	-0.03	0.01	0.01	0.108	38,10	-0.03	0.03	0.06	0.065
Tubería p6	43.1	54,58	0.0012	0.03	0.01	0.01	0.099	38,10	0.03	0.03	0.06	0.069
Tubería p7	26.66	54,58	0.0012	0.05	0.02	0.02	0.058	38,10	0.04	0.04	0.08	0.041
Tubería p8	61.1	54,58	0.0012	-0.04	0.02	0.02	0.076	38,10	-0.03	0.03	0.07	0.062
Tubería p9	43.11	54,58	0.0012	0.00	0.00	0.00	2.462	38,10	0.01	0.01	0.01	0.242
Tubería p10	63.99	54,58	0.0012	-0.08	0.04	0.04	0.032	38,10	-0.08	0.07	0.22	0.030
Tubería p11	54.23	54,58	0.0012	0.08	0.04	0.04	0.032	38,10	0.08	0.07	0.22	0.031
Tubería p12	116.2	54,58	0.0012	-0.25	0.11	0.39	0.036	38,10	-0.25	0.22	2.14	0.033
Tubería p13	16.47	54,58	0.0012	-0.07	0.03	0.03	0.032	38,10	-0.07	0.06	0.14	0.028
Tubería p14	124	54,58	0.0012	-0.08	0.03	0.04	0.035	38,10	-0.08	0.07	0.20	0.030
Tubería p15	91.83	54,58	0.0012	-0.23	0.10	0.34	0.037	38,10	-0.23	0.20	1.85	0.034
Tubería p16	70.56	54,58	0.0012	0.06	0.03	0.03	0.046	38,10	0.06	0.05	0.12	0.032
Tubería p17	44.3	54,58	0.0012	-1.11	0.47	5.09	0.024	38,10	-1.11	0.97	28.23	0.022
Tubería p18	88.52	54,58	0.0012	-1.19	0.51	5.76	0.024	38,10	-1.19	1.04	31.96	0.022
Tubería p19	50.69	54,58	0.0012	0.34	0.15	0.66	0.033	38,10	0.34	0.30	3.59	0.030
Tubería p20	86.15	54,58	0.0012	-0.30	0.13	0.52	0.035	38,10	-0.30	0.26	2.83	0.031
Tubería p21	72.72	54,58	0.0012	0.11	0.05	0.07	0.030	38,10	0.11	0.10	0.52	0.040
Tubería p22	21.25	54,58	0.0012	0.02	0.01	0.01	0.225	38,10	0.02	0.02	0.04	0.112

Tubería p23	42.99	54,58	0.0012	1.14	0.49	5.37	0.024	38,10	1.14	1.00	29.77	0.022
Tubería p24	51.74	54,58	0.0012	0.53	0.23	1.41	0.029	38,10	0.53	0.47	7.78	0.027
Tubería p25	25.87	54,58	0.0012	-0.03	0.01	0.01	0.094	38,10	-0.03	0.02	0.05	0.070
Tubería p26	62.98	54,58	0.0012	0.53	0.23	1.41	0.029	38,10	0.53	0.47	7.78	0.027
Tubería p27	15.45	54,58	0.0012	0.05	0.02	0.03	0.074	38,10	0.05	0.04	0.10	0.041
Tubería p28	26.24	54,58	0.0012	0.01	0.00	0.01	0.253	38,10	0.01	0.01	0.02	0.168
Tubería p29	16.5	54,58	0.0012	-0.02	0.01	0.00	0.000	38,10	-0.02	0.02	0.03	0.089
Tubería p30	175.5	54,58	0.0012	0.28	0.12	0.46	0.035	38,10	0.28	0.24	2.52	0.032
Tubería p31	25.51	54,58	0.0012	-0.01	0.01	0.01	0.191	38,10	-0.01	0.01	0.03	0.158
Tubería p32	97.75	54,58	0.0012	-0.16	0.07	0.19	0.040	38,10	-0.16	0.14	1.03	0.037
Tubería p33	18.68	54,58	0.0012	0.03	0.01	0.02	0.088	38,10	0.03	0.03	0.06	0.059
Tubería p34	31.81	54,58	0.0012	-0.01	0.01	0.01	0.389	38,10	-0.01	0.01	0.03	0.150
Tubería p35	129.4	54,58	0.0012	-0.69	0.29	2.23	0.027	38,10	-0.69	0.61	12.31	0.025
Tubería p36	55.98	54,58	0.0012	0.10	0.04	0.05	0.029	38,10	0.10	0.09	0.35	0.035
Tubería p37	75.35	54,58	0.0012	0.45	0.19	1.04	0.031	38,10	0.45	0.39	5.72	0.028
Tubería p39	22.05	54,58	0.0012	0.27	0.11	0.43	0.036	38,10	0.27	0.23	2.34	0.032
Tubería p40	34.47	54,58	0.0012	0.45	0.19	1.08	0.031	38,10	0.45	0.40	5.93	0.028
Tubería p41	18.84	54,58	0.0012	-0.04	0.02	0.02	0.071	38,10	-0.04	0.03	0.07	0.053
Tubería p42	33.56	54,58	0.0012	0.33	0.14	0.62	0.034	38,10	0.33	0.29	3.38	0.030
Tubería p43	85.67	54,58	0.0012	0.08	0.03	0.04	0.034	38,10	0.09	0.08	0.24	0.031
Tubería p44	33.19	54,58	0.0012	0.13	0.06	0.09	0.033	38,10	0.13	0.11	0.70	0.040
Tubería p47	29.96	54,58	0.0012	0.03	0.01	0.01	0.071	38,10	0.03	0.03	0.06	0.070
Tubería p48	10.52	54,58	0.0012	-0.17	0.07	0.20	0.040	38,10	-0.17	0.15	1.10	0.037
Tubería p49	20.14	54,58	0.0012	0.03	0.01	0.01	0.096	38,10	0.03	0.03	0.06	0.063
Tubería 1	9.25	83,42	0.0012	2.83	0.52	3.52	0.022	50,80	2.83	1.40	37.94	0.019

Tabla 41 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado  
Fuente: autor.

En la tabla 42 se presenta un resumen de las modelaciones con el diámetro optimizado, comparado con el diámetro de la norma RAS.

Tabla resumen (Pachavita)

Tramos	Longitud (m)	Diámetro (mm)		velocidad (m/s)			Presiones (mca)		pOP / pRAS	Presión estática (mca)	P trabajo tubería optimizada (mca)
		Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000	vRAS / vOP	Con F				
							Mejorado	RAS 2000			
Tubería p1	234,71	50,80	83,42	1,40	0,52	0,37	32,35	40,73	0,79	41,60	112,00
Tubería p2	46,22	38,10	54,58	0,10	0,05	0,50	38,62	47,35	0,82	48,30	294,00
Tubería p3	108,90	38,10	54,58	0,23	0,11	0,48	27,13	40,36	0,67	42,30	294,00
Tubería p4	93,33	38,10	54,58	0,02	0,01	0,50	27,40	40,66	0,67	42,60	294,00
Tubería p5	45,03	38,10	54,58	0,03	0,01	0,33	25,41	38,66	0,66	40,60	294,00
Tubería p6	43,10	38,10	54,58	0,03	0,01	0,33	28,10	41,36	0,68	43,30	294,00
Tubería p7	26,66	38,10	54,58	0,04	0,02	0,50	28,51	41,76	0,68	43,70	294,00
Tubería p8	61,10	38,10	54,58	0,03	0,02	0,67	29,41	42,66	0,69	44,60	294,00
Tubería p9	43,11	38,10	54,58	0,01	0,00	0,00	29,51	42,76	0,69	44,70	294,00
Tubería p10	63,99	38,10	54,58	0,07	0,04	0,57	32,82	46,06	0,71	48,00	294,00
Tubería p11	54,23	38,10	54,58	0,07	0,04	0,57	35,51	48,76	0,73	50,70	294,00
Tubería p12	116,20	38,10	54,58	0,22	0,11	0,50	32,37	45,41	0,71	47,30	294,00
Tubería p13	16,47	38,10	54,58	0,06	0,03	0,50	37,60	49,46	0,76	51,10	294,00

Tubería p14	124,00	38,10	54,58	0,07	0,03	0,43	37,60	49,46	0,76	51,10	294,00
Tubería p15	91,83	38,10	54,58	0,20	0,10	0,50	32,27	44,00	0,73	45,60	294,00
Tubería p16	70,56	38,10	54,58	0,05	0,03	0,60	31,16	42,89	0,73	44,50	294,00
Tubería p17	44,30	38,10	54,58	0,97	0,47	0,48	29,02	39,72	0,73	46,10	294,00
Tubería p18	88,52	38,10	54,58	1,04	0,51	0,49	32,35	40,73	0,79	41,60	294,00
Tubería p19	50,69	38,10	54,58	0,30	0,15	0,50	35,26	43,80	0,81	44,70	294,00
Tubería p20	86,15	38,10	54,58	0,26	0,13	0,50	35,26	43,80	0,81	44,70	294,00
Tubería p21	72,72	38,10	54,58	0,10	0,05	0,50	42,48	51,25	0,83	52,20	294,00
Tubería p22	21,25	38,10	54,58	0,02	0,01	0,50	35,46	44,00	0,81	44,90	294,00
Tubería p23	42,99	38,10	54,58	1,00	0,49	0,49	31,77	41,20	0,77	42,30	294,00
Tubería p24	51,74	38,10	54,58	0,47	0,23	0,49	33,76	43,53	0,78	44,70	294,00
Tubería p25	25,87	38,10	54,58	0,02	0,01	0,50	33,76	43,53	0,78	44,70	294,00
Tubería p26	62,98	38,10	54,58	0,47	0,23	0,49	29,88	39,71	0,75	40,90	294,00
Tubería p27	15,45	38,10	54,58	0,04	0,02	0,50	26,97	36,81	0,73	38,00	294,00
Tubería p28	26,24	38,10	54,58	0,01	0,00	0,00	21,77	31,61	0,69	32,80	294,00
Tubería p29	16,50	38,10	54,58	0,02	0,01	0,50	32,77	42,77	0,77	44,00	294,00
Tubería p30	175,50	38,10	54,58	0,24	0,12	0,50	22,73	33,09	0,69	34,40	294,00
Tubería p31	25,51	38,10	54,58	0,01	0,01	1,00	22,73	33,09	0,69	34,40	294,00
Tubería p32	97,75	38,10	54,58	0,14	0,07	0,50	22,73	33,09	0,69	34,40	294,00
Tubería p33	18,68	38,10	54,58	0,03	0,01	0,33	25,92	36,62	0,71	38,00	294,00
Tubería p34	31,81	38,10	54,58	0,01	0,01	1,00	25,41	38,66	0,66	40,60	294,00
Tubería p35	129,40	38,10	54,58	0,61	0,29	0,48	32,27	44,00	0,73	45,60	294,00
Tubería p36	55,98	38,10	54,58	0,09	0,04	0,44	29,51	42,76	0,69	44,70	294,00
Tubería p37	75,35	38,10	54,58	0,39	0,19	0,49	37,53	47,65	0,79	48,90	294,00
Tubería p39	22,05	38,10	54,58	0,23	0,11	0,48	25,92	36,62	0,71	38,00	294,00
Tubería p40	34,47	38,10	54,58	0,40	0,19	0,48	32,77	42,77	0,77	44,00	294,00
Tubería p41	18,84	38,10	54,58	0,03	0,02	0,67	37,53	47,65	0,79	48,90	294,00
Tubería p42	33,56	38,10	54,58	0,29	0,14	0,48	36,82	47,03	0,78	48,30	294,00
Tubería p43	85,67	38,10	54,58	0,08	0,03	0,38	25,41	38,66	0,66	40,60	294,00
Tubería p44	33,19	38,10	54,58	0,11	0,06	0,55	34,61	45,07	0,77	46,40	294,00
Tubería p47	29,96	38,10	54,58	0,03	0,01	0,33	45,48	53,92	0,84	55,20	294,00
Tubería p48	10,52	38,10	54,58	0,15	0,07	0,47	36,27	46,52	0,78	47,80	294,00
Tubería p49	20,14	38,10	54,58	0,03	0,01	0,33	34,06	43,83	0,78	45,00	294,00
Tubería 1	9,25	50,80	83,42	1,40	0,52	0,37	3,95	4,26	0,93	4,30	112,00

Tabla 42 Comparación de resultados: diámetro optimizado vs. diámetro RAS.  
Fuente: autor.

En la tabla 43 se presenta la comparación de precios de tubería, calculado con el diámetro optimizado y el diámetro de la norma RAS.

Tramos	Longitud (m)	Costos			
		(\$/ml)		Totales	
		Con F		Con F	
		Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000
Tubería p1	234,71	\$ 14.846	\$ 22.252	\$ 3.484.505	\$ 5.222.767
Tubería p2	46,22	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 561.804	\$ 686.182
Tubería p3	108,90	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.323.680	\$ 1.616.729
Tubería p4	93,33	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.134.426	\$ 1.385.577
Tubería p5	45,03	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 547.340	\$ 668.515

Tubería p6	43,10	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 523.881	\$ 639.863
Tubería p7	26,66	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 324.052	\$ 395.794
Tubería p8	61,10	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 742.671	\$ 907.091
Tubería p9	43,11	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 524.002	\$ 640.011
Tubería p10	63,99	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 777.798	\$ 949.996
Tubería p11	54,23	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 659.166	\$ 805.099
Tubería p12	116,20	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.412.411	\$ 1.725.105
Tubería p13	16,47	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 200.193	\$ 244.514
Tubería p14	124,00	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.507.220	\$ 1.840.904
Tubería p15	91,83	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.116.194	\$ 1.363.308
Tubería p16	70,56	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 857.657	\$ 1.047.534
Tubería p17	44,30	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 538.467	\$ 657.678
Tubería p18	88,52	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.075.961	\$ 1.314.168
Tubería p19	50,69	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 616.137	\$ 752.544
Tubería p20	86,15	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.047.153	\$ 1.278.983
Tubería p21	72,72	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 883.912	\$ 1.079.601
Tubería p22	21,25	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 258.294	\$ 315.478
Tubería p23	42,99	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 522.543	\$ 638.230
Tubería p24	51,74	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 628.900	\$ 768.132
Tubería p25	25,87	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 314.450	\$ 384.066
Tubería p26	62,98	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 765.522	\$ 935.001
Tubería p27	15,45	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 187.795	\$ 229.371
Tubería p28	26,24	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 318.947	\$ 389.559
Tubería p29	16,50	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 200.558	\$ 244.959
Tubería p30	175,50	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 2.133.203	\$ 2.605.473
Tubería p31	25,51	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 310.074	\$ 378.721
Tubería p32	97,75	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.188.151	\$ 1.451.197
Tubería p33	18,68	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 227.055	\$ 277.323
Tubería p34	31,81	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 386.651	\$ 472.251
Tubería p35	129,40	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.572.857	\$ 1.921.072
Tubería p36	55,98	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 680.437	\$ 831.079
Tubería p37	75,35	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 915.879	\$ 1.118.646
Tubería p39	22,05	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 268.018	\$ 327.354
Tubería p40	34,47	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 418.983	\$ 511.742
Tubería p41	18,84	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 229.000	\$ 279.699
Tubería p42	33,56	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 407.922	\$ 498.232
Tubería p43	85,67	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 1.041.319	\$ 1.271.857
Tubería p44	33,19	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 403.424	\$ 492.739
Tubería p47	29,96	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 364.164	\$ 444.786
Tubería p48	10,52	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 127.871	\$ 156.180
Tubería p49	20,14	\$ 12.155	\$ 14.846	\$ 244.802	\$ 298.998
Tubería 1	9,25	\$ 14.846	\$ 22.252	\$ 137.326	\$ 205.831
TOTAL				\$ 34.112.769	\$ 42.669.937

Tabla 43 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con diámetros de la norma RAS.  
Fuente: autor.

### 7.2.3. Turmequé

#### 7.2.3.1. Generalidades<sup>75</sup>

El municipio de Turmequé se encuentra ubicado en el centro del departamento de Boyacá, con coordenadas 5°18'50" latitud norte y 73°30' al oeste del meridiano de Greenwich, con una elevación de 2.389 msnm y temperatura promedio de 14 °C. Tiene una extensión de 106 km<sup>2</sup>.

Turmequé limita al norte con Nuevo Colón, al sur con Villapinzón (Cundinamarca), al occidente con Ventaquemada y al oriente con el municipio de Úmbita,

En la ilustración 21<sup>76</sup> se ubica Turmequé en el departamento de Boyacá.

#### 7.2.3.2. Descripción del sistema de acueducto<sup>77</sup>

**Captación:** el municipio tiene cinco captaciones superficiales. La captación I es un canal que recolecta agua de un nacedero. La II recibe el caudal de la I y de aguas de infiltración mediante tubería perforada de PVC. La captación III recibe aguas de infiltración que provienen de la captación I, mediante tubería perforada de 6 y 3". Las captaciones IV y V recolectan agua de nacederos mediante tuberías perforadas de gres de 4".

**Aducciones:** de las captaciones se desprenden las aducciones. De la captación I a la II en tubería de PVC de 6", con una longitud aproximada de 38 m. De la captación II al desarenador I, tubería PVC de 3", con una longitud aproximada de 135 m. De la captación III al desarenador I, en tubería PVC de 3", con una longitud aproximada de 22 m. De la captación IV al desarenador II, en tubería PVC de 3", con una longitud aproximada de 262 m y de la captación V al desarenador II, en tubería PVC de 3", con 52 m de longitud.

**Desarenador:** el sistema tiene dos desarenadores. El desarenador I tiene 1,90 m de largo, 0,85 m de ancho y 0,80 m de altura. Está hecho en mampostería pañetada y esmaltada. El desarenador II es de 5,45 m de alto, 1,45 m de ancho y 0,95 m de altura.

**Conducción:** del desarenador I a la PTAP, en PVC de 3", con una longitud aproximada de 8.200 m. Del desarenador II a la PTAP, en tubería de PVC de 4", con una longitud aproximada de 2.650 m y en tubería PVC de 3", con una longitud aproximada de 3.360 m. Las dos conducciones poseen una cámara de quiebre de presión dada la altura estática entre los puntos de salida y llegada.

---

<sup>75</sup> [http://www.turmeque-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.turmeque-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml).

<sup>76</sup> [http://geoportal.igac.gov.co/mapas\\_de\\_colombia/igac/politicos\\_admin\\_2014/Boyaca.pdf](http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/igac/politicos_admin_2014/Boyaca.pdf).

<sup>77</sup> FORMULACIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS PLANES MAESTROS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE LOS SEIS (6) GRUPOS CONFORMADOS POR VEINTINUEVE (29) MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ GRUPO A, Consorcio INALCOM-ILAM-CRA, octubre de 2011.

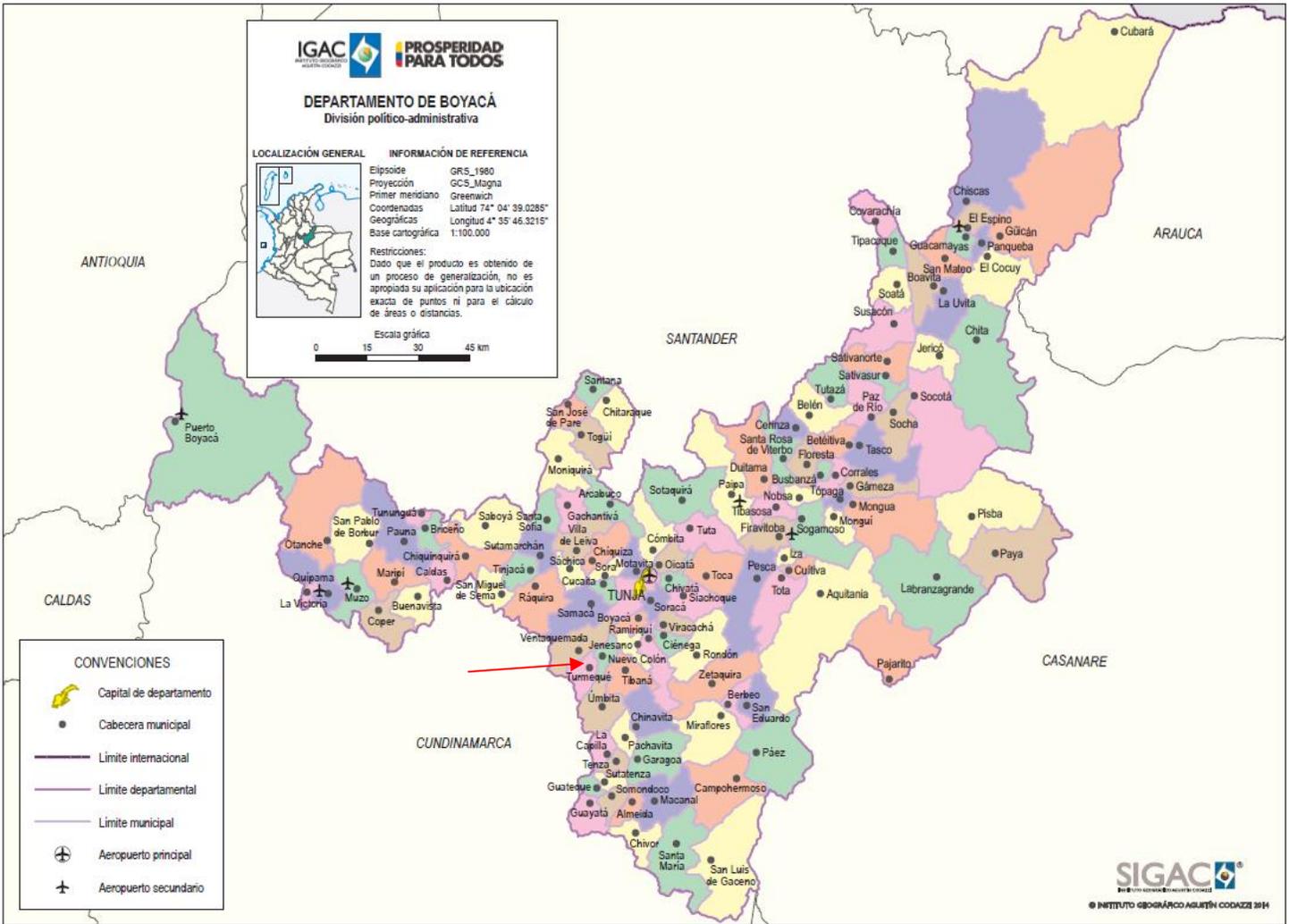


Ilustración 21 Ubicación de Turmequé en el departamento de Boyacá.

Tanque de almacenamiento: el sistema tiene dos tanques con capacidad de 113 y 116 m<sup>3</sup>, respectivamente, construidos en concreto reforzado.

Conducción tanque I – tanque II: PVC de 3”, con una longitud aproximada de 273 m.

Conducción tanque II – red de distribución: PVC de 4”, con una longitud aproximada de 76 m.

Red de distribución: en PVC con diámetros v de 2, 3 y 4”.

### 7.2.3.3. Parámetros de diseño

#### 7.2.3.3.1. Población y proyección de la población

Como se indicó, se consultaron los censos entre 1973 y 2005, con esta información se proyectó la población hasta el periodo de diseño.

Los datos se relacionan en la tabla 42.

### Datos censos DANE, Turmequé

Año	Año censado				Actual
	1973	1985	1993	2005	2015
Cabecera (habitantes)	1.466	1.842	1.961	2.384	2.524

Tabla 44 Población censada <sup>78</sup> y población actual <sup>79</sup>. Turmequé

Con los datos de la tabla 42 se hicieron las proyecciones aritmética, geométrica y exponencial, cuyos resultados aparecen en la tabla 43.

POBLACIÓN PROYECTADA				
Año	Aritmética	Geométrica	Exponencial	Promedio
2015	2.524	2.524	2.524	2.524
2020	2.643	2.683	2.683	2.670
2025	2.763	2.852	2.852	2.822
2030	2.882	3.032	3.031	2.982
2035	3.001	3.223	3.222	3.149
2040	3.121	3.426	3.425	3.324

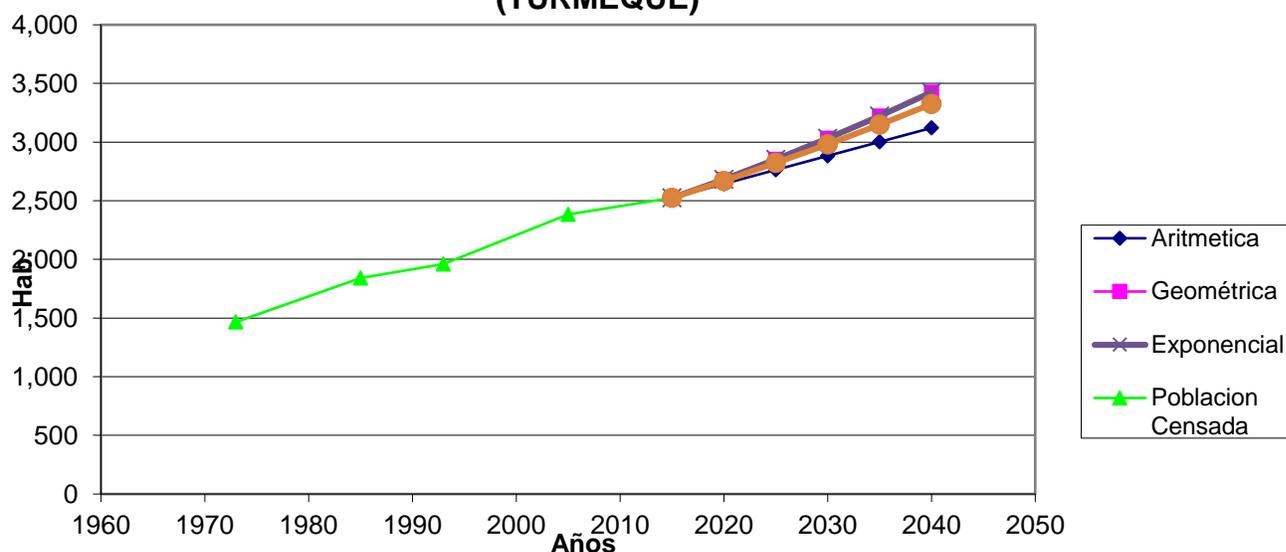
Tabla 45 Proyección de poblaciones. Turmequé.

Fuente: autor.

Los cálculos anteriores se reflejan en el gráfico 6, donde también se incluye la población censada.

Como se observa, las proyecciones realizadas por los tres métodos arrojaron resultados muy similares, por lo cual se determinó sacar el promedio de los tres métodos, que fue la población que se adoptó al final para el diseño.

### CURVA DE POBLACIÓN ACTUAL Y FUTURA (TURMEQUÉ)



<sup>78</sup> Fuente DANE.

<sup>79</sup> <http://www.turmeque-boyaca.gov.co/indicadores.shtml>.

Gráfico 7 Población actual y futura. Turmequé  
Fuente: autor.

7.2.3.3.2. Nivel de complejidad del sistema

Como la población se encuentra entre 2.500 y 12.500 habitantes al final del periodo de diseño, el municipio es de categoría 6<sup>80</sup> con un nivel de complejidad medio.

7.2.3.3.3. Caudal de diseño

Dotación	115 L/hab día
Pérdidas técnicas	25%
Dotación corregida	153,33 L/hab día

	Doméstico
Caudal Medio Diario (Qmd)	5,9 L/s
Factor K1	1,30
Caudal Máximo Diario (QMD)	7,67 L/s
Factor K2	1,50
Caudal Máximo Horario (QMH)	11,51 L/s

Caudal comercial, institucional 38.700,49 L/día Asumimos 10% del Qmd

Con esta información se determinó el caudal de diseño para periodos de cinco años hasta el periodo de diseño, los resultados se resumen en la tabla 44.

Demanda de agua				
AÑO	Población (Hab)	Qmd (L/s)	QMD (L/s)	QMH (L/s)
2015	2.524	4,93	6,41	9,62
2020	2.670	5,19	6,75	10,13
2025	2.822	5,46	7,10	10,65
2030	2.982	5,74	7,46	11,19
2035	3.149	6,04	7,85	11,78
2040	3.324	6,35	8,26	12,39

Tabla 46 Caudales de diseño en periodos de cinco años  
Fuente: autor.

7.2.3.4. Modelación del sistema

<sup>80</sup> [http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04\\_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIKcA BHA0L6\\_Tzyc1P1C3IjygHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T1I1VUZVUzI1UTIwQUU3R083MU wxM0gw/](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes/home/internet/productos/categorizacion-dep-mun/!ut/p/b1/04_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoONTA1MDBwNTA0tTYL8jAwCTIAKIKcA BHA0L6_Tzyc1P1C3IjygHTUGxv/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzA2T1I1VUZVUzI1UTIwQUU3R083MU wxM0gw/).

La modelación se realizó con el programa Epanet Brasil, que tiene un módulo adicional de optimización de costos, lo que facilita el análisis económico. Para este cálculo, los precios de la tabla 22 se introducen en el modelo y se corre el módulo de optimización.

En el caso del análisis de las redes de distribución, los caudales en los nodos se determinaron por el método caudal por metro lineal de tubería, que consiste en dividir el caudal de diseño de la red entre la longitud total de la tubería de la red y, luego, el cociente se multiplica por la longitud de cada tramo.

### 7.2.3.5. Esquema de la red

El esquema extraído del Epanet Brasil se muestra en la Ilustración 22, donde se encuentra la conducción tanque - red de distribución y la red de distribución.

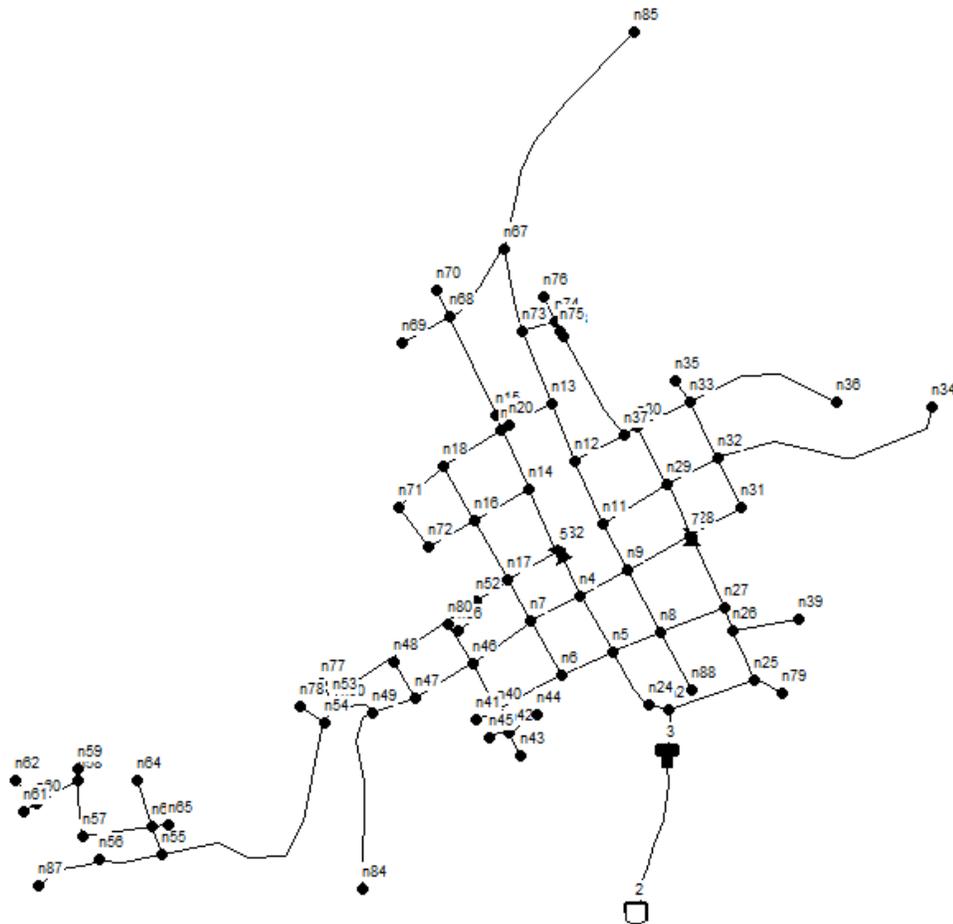


Ilustración 22. Conducción tanque red - red de distribución, municipio de Turmequé  
Fuente: autor

### 7.2.3.6. Tablas de entrada nudos y tubería.

Localidad: Turmequé  
 Tabla de Red -  
 Nudos

	Cota	Demanda
ID Nudo	m	LPS
Conexión n2	2404.59	0.090
Conexión n4	2389.93	0.140
Conexión n5	2394.15	0.120
Conexión n6	2392.05	0.060
Conexión n7	2383.09	0.140
Conexión n8	2390.87	0.220
Conexión n9	2387.60	0.250
Conexión n11	2377.37	0.250
Conexión n12	2372.78	0.220
Conexión n13	2364.50	0.250
Conexión n14	2376.44	0.240
Conexión n15	2376.78	0.250
Conexión n16	2366.44	0.230
Conexión n17	2377.68	0.160
Conexión n18	2355.19	0.310
Conexión n19	2371.43	0.090
Conexión n20	2374.81	0.100
Conexión n24	2401.30	0.010
Conexión n25	2399.67	0.200
Conexión n26	2385.59	0.140
Conexión n27	2384.37	0.180
Conexión n28	2378.22	0.280
Conexión n29	2367.25	0.260
Conexión n30	2357.41	0.190
Conexión n31	2375.68	0.390
Conexión n32	2365.06	0.330
Conexión n33	2354.77	0.310
Conexión n34	2327.46	0.410
Conexión n35	2351.08	0.280
Conexión n36	2337.15	0.790
Conexión n37	2358.43	0.160
Conexión n38	2369.62	0.250
Conexión n39	2399.38	0.000
Conexión n40	2382.05	0.090

Conexión n41	2391.91	0.090
Conexión n42	2390.63	0.050
Conexión n43	2395.38	0.060
Conexión n44	2394.92	0.160
Conexión n45	2391.91	0.110
Conexión n46	2377.42	0.170
Conexión n47	2383.34	0.130
Conexión n48	2370.62	0.360
Conexión n49	2386.13	0.170
Conexión n50	2378.38	0.060
Conexión n52	2374.41	0.130
Conexión n53	2374.94	0.030
Conexión n54	2374.36	0.380
Conexión n55	2356.22	0.300
Conexión n56	2351.98	0.120
Conexión n57	2349.83	0.190
Conexión n58	2345.40	0.100
Conexión n59	2344.11	0.260
Conexión n60	2346.57	0.100
Conexión n61	2347.00	0.090
Conexión n62	2347.23	0.120
Conexión n63	2353.87	0.090
Conexión n64	2346.24	0.130
Conexión n65	2353.79	0.340
Conexión n66	2372.98	0.070
Conexión n67	2386.30	0.240
Conexión n68	2388.69	0.260
Conexión n69	2387.59	0.430
Conexión n70	2387.98	0.230
Conexión n71	2352.08	0.160
Conexión n72	2359.58	0.240
Conexión n73	2381.91	0.290
Conexión n74	2373.18	0.070
Conexión n75	2369.62	0.030
Conexión n76	2378.12	0.190
Conexión n77	2378.41	0.160
Conexión n78	2378.27	0.110
Conexión n79	2400.63	0.000
Conexión n80	2372.27	0.160
Conexión n82	2383.87	0.200
Conexión n84	2385.14	0.870

Conexión n85	2362.19	0.000
Conexión n87	2351.19	0.090
Conexión n88	2394.47	0.190
Conexión 4	2383.87	0.000
Conexión 5	2383.87	0.000
Conexión 6	2378.22	0.000
Conexión 7	2378.22	0.000
Embalse 1	2650.10	-90.210
Depósito 3	2426.10	29.450
Depósito 2	2646.10	45.650

*Tabla 47 Datos de entrada – Nudos*  
Fuente: autor

Localidad: Turmequé

Tabla de Red - Líneas

	Longitud	Diámetro	Rugosidad
ID Línea	m	mm	mm
Tubería p2	105.2	76.2	0.0012
Tubería p3	90.93	76.2	0.0012
Tubería p4	101.5	76.2	0.0012
Tubería p5	84.29	76.2	0.0012
Tubería p6	115.4	76.2	0.0012
Tubería p7	87.35	76.2	0.0012
Tubería p8	111.1	76.2	0.0012
Tubería p9	101.6	76.2	0.0012
Tubería p10	130.9	76.2	0.0012
Tubería p11	103.1	76.2	0.0012
Tubería p12	89.35	76.2	0.0012
Tubería p13	76.39	76.2	0.0012
Tubería p14	102.8	76.2	0.0012
Tubería p15	110.9	76.2	0.0012
Tubería p16	87.51	76.2	0.0012
Tubería p17	78.69	76.2	0.0012
Tubería p18	75.47	101.6	0.0012
Tubería p21	85.77	50.8	0.0012
Tubería p22	40.38	50.8	0.0012
Tubería p23	125.54	50.8	0.0012
Tubería p24	92.04	50.8	0.0012
Tubería p25	105.3	50.8	0.0012
Tubería p26	110.8	50.8	0.0012
Tubería p27	118.09	50.8	0.0012

Tubería p28	93.97	50.8	0.0012
Tubería p29	90.2	50.8	0.0012
Tubería p30	101.2	50.8	0.0012
Tubería p31	393.3	50.8	0.0012
Tubería p32	92.48	50.8	0.0012
Tubería p33	42.09	50.8	0.0012
Tubería p34	262	50.8	0.0012
Tubería p35	95.15	50.8	0.0012
Tubería p36	90.76	50.8	0.0012
Tubería p37	189.7	50.8	0.0012
Tubería p38	122.9	50.8	0.0012
Tubería p39	107.3	50.8	0.0012
Tubería p40	121.3	50.8	0.0012
Tubería p41	36.42	50.8	0.0012
Tubería p42	42.58	50.8	0.0012
Tubería p43	40.49	50.8	0.0012
Tubería p44	55.35	50.8	0.0012
Tubería p45	36.41	50.8	0.0012
Tubería p46	86.15	50.8	0.0012
Tubería p47	108.7	50.8	0.0012
Tubería p48	67.57	50.8	0.0012
Tubería p49	117.5	50.8	0.0012
Tubería p50	74.36	50.8	0.0012
Tubería p51	57.66	50.8	0.0012
Tubería p52	62.55	50.8	0.0012
Tubería p53	287.2	50.8	0.0012
Tubería p54	37.11	50.8	0.0012
Tubería p55	435.9	50.8	0.0012
Tubería p56	105.2	50.8	0.0012
Tubería p57	90.93	50.8	0.0012
Tubería p58	20.05	50.8	0.0012
Tubería p59	78.22	50.8	0.0012
Tubería p60	24.37	50.8	0.0012
Tubería p61	50.59	50.8	0.0012
Tubería p62	114.2	50.8	0.0012
Tubería p63	78.42	50.8	0.0012
Tubería p64	27.35	50.8	0.0012
Tubería p65	48.33	50.8	0.0012
Tubería p66	72.6	50.8	0.0012
Tubería p67	144.8	50.8	0.0012
Tubería p68	87.19	50.8	0.0012

Tubería p69	47.97	50.8	0.0012
Tubería p70	178.7	50.8	0.0012
Tubería p71	98.42	50.8	0.0012
Tubería p72	79.58	50.8	0.0012
Tubería p73	54.41	50.8	0.0012
Tubería p74	18.48	50.8	0.0012
Tubería p75	41.8	50.8	0.0012
Tubería p76	34.7	50.8	0.0012
Tubería p77	47.27	50.8	0.0012
Tubería p78	53.08	50.8	0.0012
Tubería p79	75.02	50.8	0.0012
Tubería p80	110.9	76.2	0.0012
Tubería p81	97.55	76.2	0.0012
Tubería p82	74.48	76.2	0.0012
Tubería p83	135.9	76.2	0.0012
Tubería p84	24.55	50.8	0.0012
Tubería p85	301.1	50.8	0.0012
Tubería p87	426.8	50.8	0.0012
Tubería p88	86.42	50.8	0.0012
Tubería p89	112	50.8	0.0012
Tubería p90	104.3	76.2	0.0012
Tubería p91	105.6	50.8	0.0012
Tubería p92	115.1	76.2	0.0012
Tubería p93	126.7	76.2	0.0012
Tubería p107	272.7	76.2	0.0012
Tubería p19	35.42	101.6	0.0012
Tubería p20	146.15	50.8	0.0012
Tubería 1	1	76.2	0.0012
Tubería 4	2.31	76.2	0.0012
Tubería 6	1.73	200	0.1
Válvula 3	No Disponible	76.2	No Disponible
Válvula 5	No Disponible	50.8	No Disponible

*Tabla 48 Datos de entrada – Tuberías*  
Fuente: Autor

En las tablas 49 y 50 se relacionan los datos de los cálculos obtenidos una vez corridos los modelos optimizado y no optimizado.

#### 7.2.3.7. Simulación hidráulica

En las tablas 49 y 50 se relacionan los datos de los cálculos obtenidos una vez corridos los modelos optimizado y no optimizado.

Modelación según  
normatividad RAS  
Tabla de Red -  
Nudos

Modelación reduciendo diámetros

Tabla de Red - Nudos

	Cota	Demanda Base	Demanda	Altura	Presión	Demanda	Altura	Presión
ID Nudo	m	LPS	LPS	m	m	LPS	m	m
Conexión n2	2404.59	0.0853	0.090	2425.01	20.42	0.090	2425.01	20.42
Conexión n4	2389.93	0.136	0.140	2415.60	25.67	0.140	2415.59	25.66
Conexión n5	2394.15	0.1161	0.120	2416.80	22.65	0.120	2416.80	22.65
Conexión n6	2392.05	0.0625	0.060	2416.04	23.99	0.060	2416.05	24.00
Conexión n7	2383.09	0.142	0.140	2415.67	32.58	0.140	2415.66	32.57
Conexión n8	2390.87	0.2157	0.220	2415.97	25.10	0.220	2415.97	25.10
Conexión n9	2387.60	0.2502	0.250	2415.73	28.13	0.250	2415.73	28.13
Conexión n11	2377.37	0.2542	0.250	2395.12	17.75	0.250	2388.34	10.97
Conexión n12	2372.78	0.2184	0.220	2395.08	22.30	0.220	2388.23	15.45
Conexión n13	2364.50	0.2485	0.250	2395.07	30.57	0.250	2388.22	23.72
Conexión n14	2376.44	0.2405	0.240	2401.15	24.71	0.240	2413.22	36.78
Conexión n15	2376.78	0.2497	0.250	2400.77	23.99	0.250	2412.84	36.06
Conexión n16	2366.44	0.2349	0.230	2401.10	34.66	0.230	2412.34	45.90
Conexión n17	2377.68	0.1598	0.160	2401.11	23.43	0.160	2413.06	35.38
Conexión n18	2355.19	0.3118	0.310	2401.06	45.87	0.310	2411.84	56.65
Conexión n19	2371.43	0.0919	0.090	2401.06	29.63	0.090	2411.81	40.38
Conexión n20	2374.81	0.0963	0.100	2395.07	20.26	0.100	2388.22	13.41
Conexión n24	2401.30	0.008	0.010	2424.37	23.07	0.010	2424.37	23.07
Conexión n25	2399.67	0.2003	0.200	2418.62	18.95	0.200	2418.62	18.95
Conexión n26	2385.59	0.1385	0.140	2415.30	29.71	0.140	2415.30	29.71
Conexión n27	2384.37	0.1798	0.180	2413.86	29.49	0.180	2413.86	29.49
Conexión n28	2378.22	0.2835	0.280	2398.22	20.00	0.280	2403.07	24.85
Conexión n29	2367.25	0.2587	0.260	2395.68	28.43	0.260	2389.56	22.31
Conexión n30	2357.41	0.185	0.190	2395.11	37.70	0.190	2388.06	30.65
Conexión n31	2375.68	0.3879	0.390	2396.61	20.93	0.390	2393.46	17.78
Conexión n32	2365.06	0.3326	0.330	2395.60	30.54	0.330	2388.29	23.23
Conexión n33	2354.77	0.3059	0.310	2395.00	40.23	0.310	2386.97	32.20
Conexión n34	2327.46	0.405	0.410	2395.11	67.65	0.410	2383.76	56.30
Conexión n35	2351.08	0.2835	0.280	2394.97	43.89	0.280	2386.86	35.78
Conexión n36	2337.15	0.7886	0.790	2393.96	56.81	0.790	2377.23	40.08
Conexión n37	2358.43	0.1612	0.160	2395.08	36.65	0.160	2388.07	29.64
Conexión n38	2369.62	0.2494	0.250	2394.98	25.36	0.250	2387.67	18.05
Conexión n39	2399.38	0	0.000	2415.30	15.92	0.000	2415.30	15.92

Conexión n40	2382.05	0.0924	0.090	2414.94	32.89	0.090	2412.16	30.11
Conexión n41	2391.91	0.0924	0.090	2414.94	23.03	0.090	2412.15	20.24
Conexión n42	2390.63	0.0511	0.050	2414.90	24.27	0.050	2411.98	21.35
Conexión n43	2395.38	0.0581	0.060	2414.90	19.52	0.060	2411.97	16.59
Conexión n44	2394.92	0.1577	0.160	2414.88	19.96	0.160	2411.93	17.01
Conexión n45	2391.91	0.1054	0.110	2414.89	22.98	0.110	2411.96	20.05
Conexión n46	2377.42	0.1705	0.170	2414.66	37.24	0.170	2411.25	33.83
Conexión n47	2383.34	0.1279	0.130	2413.18	29.84	0.130	2405.37	22.03
Conexión n48	2370.62	0.3589	0.360	2413.11	42.49	0.360	2405.11	34.49
Conexión n49	2386.13	0.1726	0.170	2412.64	26.51	0.170	2403.27	17.14
Conexión n50	2378.38	0.0635	0.060	2412.64	34.26	0.060	2403.26	24.88
Conexión n52	2374.41	0.1343	0.130	2398.74	24.33	0.130	2410.69	36.28
Conexión n53	2374.94	0.0341	0.030	2389.21	14.27	0.030	2401.16	26.22
Conexión n54	2374.36	0.3794	0.380	2388.14	13.78	0.380	2400.09	25.73
Conexión n55	2356.22	0.2963	0.300	2379.69	23.47	0.300	2366.59	10.37
Conexión n56	2351.98	0.1244	0.120	2379.65	27.67	0.120	2366.42	14.44
Conexión n57	2349.83	0.1919	0.190	2378.62	28.79	0.190	2362.36	12.53
Conexión n58	2345.40	0.1048	0.100	2378.35	32.95	0.100	2361.30	15.90
Conexión n59	2344.11	0.2558	0.260	2378.34	34.23	0.260	2361.25	17.14
Conexión n60	2346.57	0.0988	0.100	2378.29	31.72	0.100	2361.06	14.49
Conexión n61	2347.00	0.0917	0.090	2378.29	31.29	0.090	2361.05	14.05
Conexión n62	2347.23	0.1179	0.120	2378.28	31.05	0.120	2361.03	13.80
Conexión n63	2353.87	0.0916	0.090	2379.15	25.28	0.090	2364.44	10.57
Conexión n64	2346.24	0.1343	0.130	2379.13	32.89	0.130	2364.38	18.14
Conexión n65	2353.79	0.341	0.340	2379.12	25.33	0.340	2364.34	10.55
Conexión n66	2372.98	0.0661	0.070	2398.74	25.76	0.070	2410.69	37.71
Conexión n67	2386.30	0.2366	0.240	2397.34	11.04	0.240	2410.08	23.78
Conexión n68	2388.69	0.2596	0.260	2397.93	9.24	0.260	2412.43	23.74
Conexión n69	2387.59	0.4316	0.430	2397.81	10.22	0.430	2411.95	24.36
Conexión n70	2387.98	0.2347	0.230	2397.91	9.93	0.230	2412.34	24.36
Conexión n71	2352.08	0.1622	0.160	2401.05	48.97	0.160	2411.84	59.76
Conexión n72	2359.58	0.2396	0.240	2401.05	41.47	0.240	2411.92	52.34
Conexión n73	2381.91	0.2878	0.290	2397.29	15.38	0.290	2408.89	26.98
Conexión n74	2373.18	0.0682	0.070	2397.26	24.08	0.070	2408.75	35.57
Conexión n75	2369.62	0.0277	0.030	2397.26	27.64	0.030	2408.75	39.13
Conexión n76	2378.12	0.1854	0.190	2397.24	19.12	0.190	2408.70	30.58
Conexión n77	2378.41	0.1641	0.160	2389.20	10.79	0.160	2401.12	22.71
Conexión n78	2378.27	0.1066	0.110	2388.13	9.86	0.110	2400.07	21.80
Conexión n79	2400.63	0	0.000	2418.62	17.99	0.000	2418.62	17.99
Conexión n80	2372.27	0.1631	0.160	2414.64	42.37	0.160	2411.18	38.91
Conexión n82	2383.87	0.1981	0.200	2401.82	17.95	0.200	2413.83	29.96

Conexión n84	2385.14	0.8696	0.870	2411.23	26.09	0.870	2397.69	12.55
Conexión n85	2362.19	0	0.000	2397.34	35.15	0.000	2410.08	47.89
Conexión n87	2351.19	0.0901	0.090	2379.64	28.45	0.090	2366.39	15.20
Conexión n88	2394.47	0.1897	0.190	2415.93	21.46	0.190	2415.83	21.36
Conexión 4	2383.87	0	0.000	2413.83	29.96			
Conexión 5	2383.87	0	0.000	2401.87	18.00			
Conexión 6	2378.22	0	0.000	2403.07	24.85			
Conexión 7	2378.22	0	0.000	2398.22	20.00			
Embalse 1	2650.10	No Disponible	-90.210	2650.10	0.00	-90.210	2650.10	0.00
Depósito 3	2426.10	No Disponible	29.450	2427.10	1.00	29.450	2427.10	1.00
Depósito 2	2646.10	No Disponible	45.650	2647.10	1.00	45.650	2647.10	1.00

Tabla 49 Resultados nudos de la red, no optimizado y optimizado.

Fuente: autor

Localidad: Turmequé  
Modelación según normatividad RAS  
2000

Tabla de Red - Líneas

Tabla de Red - Líneas

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción	Diámetro mm	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería p2	105.2	76.2	0.0012	4.29	0.94	11.45	0.019	76.2	0.94	11.51	0.019
Tubería p3	90.93	76.2	0.0012	3.6	0.79	8.38	0.02	76.2	0.79	8.29	0.02
Tubería p4	101.5	76.2	0.0012	2.28	0.5	3.71	0.022	76.2	0.51	3.87	0.022
Tubería p5	84.29	76.2	0.0012	3.95	0.87	9.89	0.02	76.2	0.87	9.92	0.02
Tubería p6	115.4	76.2	0.0012	1.63	0.36	2.06	0.024	76.2	0.36	2.07	0.024
Tubería p7	87.35	76.2	0.0012	0	0	0	0	76.2	0	0	0
Tubería p8	111.1	76.2	0.0012	0.6	0.13	0.36	0.031	76.2	0.24	0.99	0.027
Tubería p9	101.6	76.2	0.0012	0.34	0.08	0.14	0.036	76.2	0.08	0.14	0.036
Tubería p10	130.9	76.2	0.0012	1.98	0.43	2.9	0.023	76.2	0.43	2.9	0.023
Tubería p11	103.1	76.2	0.0012	-0.71	0.16	0.48	0.03	38.1	0.49	8.53	0.026
Tubería p12	89.35	76.2	0.0012	-0.91	0.2	0.75	0.028	76.2	0.2	0.72	0.028
Tubería p13	76.39	76.2	0.0012	0	0	0	0	76.2	0	0	0
Tubería p14	102.8	76.2	0.0012	0.55	0.12	0.31	0.032	38.1	0.35	4.82	0.029
Tubería p15	110.9	76.2	0.0012	0.09	0.02	0.01	0.04	38.1	0.08	0.29	0.033
Tubería p16	87.51	76.2	0.0012	-1.38	0.3	1.53	0.025	76.2	0.3	1.55	0.025
Tubería p17	78.69	76.2	0.0012	-0.1	0.02	0.01	0.044	76.2	0.02	0.01	0.044
Tubería p18	75.47	101.6	0.0012	15.11	1.86	27.68	0.016	101.6	1.86	27.68	0.016
Tubería p21	85.77	50.8	0.0012	2.86	1.41	38.74	0.019	50.8	1.41	38.75	0.019
Tubería p22	40.38	50.8	0.0012	2.72	1.34	35.45	0.02	50.8	1.34	35.45	0.02
Tubería p23	125.54	50.8	0.0012	4.46	2.2	86.01	0.018	50.8	2.2	86.01	0.018
Tubería p24	92.04	50.8	0.0012	2.37	1.17	27.63	0.02	38.1	2.44	146.76	0.018

Tubería p25	105.3	50.8	0.0012	0.94	0.47	5.43	0.025	38.1	0.66	14.25	0.025
Tubería p26	110.8	50.8	0.0012	1.92	0.95	19	0.021	50.8	0.95	19	0.021
Tubería p27	118.09	50.8	0.0012	0	0	0	0	50.8	0	0	0
Tubería p28	93.97	50.8	0.0012	1.81	0.89	17.13	0.021	31.75	1.76	102.26	0.021
Tubería p29	90.2	50.8	0.0012	1.42	0.7	11.17	0.023	31.75	1.27	57.24	0.022
Tubería p30	101.2	50.8	0.0012	1	0.49	5.97	0.025	38.1	0.63	13.12	0.025
Tubería p31	393.3	50.8	0.0012	0.41	0.2	1.24	0.031	31.75	0.51	11.54	0.027
Tubería p32	92.48	50.8	0.0012	0.31	0.15	0.8	0.033	31.75	0.56	13.68	0.027
Tubería p33	42.09	50.8	0.0012	0.28	0.14	0.68	0.034	38.1	0.25	2.62	0.032
Tubería p34	262	50.8	0.0012	0.79	0.39	3.96	0.026	31.75	1	37.17	0.023
Tubería p35	95.15	50.8	0.0012	-0.38	0.19	1.12	0.032	38.1	0.58	11.48	0.025
Tubería p36	90.76	50.8	0.0012	-0.03	0.02	0.02	0.077	50.8	0.25	1.85	0.029
Tubería p37	189.7	50.8	0.0012	0.25	0.12	0.54	0.036	38.1	0.22	2.1	0.033
Tubería p38	122.9	50.8	0.0012	0.85	0.42	4.53	0.026	50.8	0.65	9.88	0.023
Tubería p39	107.3	50.8	0.0012	0	0	0	0	38.1	0	0	0
Tubería p40	121.3	50.8	0.0012	1.26	0.62	9.06	0.023	38.1	1.04	32.1	0.022
Tubería p41	36.42	50.8	0.0012	0.09	0.05	0.06	0.029	38.1	0.08	0.29	0.033
Tubería p42	42.58	50.8	0.0012	0.37	0.18	1.08	0.032	38.1	0.33	4.2	0.029
Tubería p43	40.49	50.8	0.0012	0.06	0.03	0.04	0.045	38.1	0.05	0.11	0.033
Tubería p44	55.35	50.8	0.0012	0.16	0.08	0.25	0.041	38.1	0.14	0.96	0.038
Tubería p45	36.41	50.8	0.0012	0.11	0.05	0.08	0.029	38.1	0.09	0.43	0.038
Tubería p46	86.15	50.8	0.0012	0.71	0.35	3.26	0.027	38.1	0.55	10.51	0.026
Tubería p47	108.7	50.8	0.0012	1.59	0.79	13.66	0.022	38.1	1.4	54.1	0.021
Tubería p48	67.57	50.8	0.0012	-0.36	0.18	1.01	0.032	38.1	0.31	3.94	0.03
Tubería p49	117.5	50.8	0.0012	-1.22	0.6	8.54	0.023	38.1	1.14	37.5	0.022
Tubería p50	74.36	50.8	0.0012	1.11	0.55	7.17	0.024	38.1	0.97	28.29	0.022
Tubería p51	57.66	50.8	0.0012	-0.06	0.03	0.04	0.042	38.1	0.06	0.13	0.031
Tubería p52	62.55	50.8	0.0012	2.82	1.39	37.87	0.019	50.8	1.39	37.87	0.019
Tubería p53	287.2	50.8	0.0012	2.62	1.29	33.2	0.02	50.8	1.29	33.2	0.02
Tubería p54	37.11	50.8	0.0012	2.42	1.2	28.86	0.02	50.8	1.2	28.86	0.02
Tubería p55	435.9	50.8	0.0012	1.94	0.96	19.37	0.021	38.1	1.7	76.85	0.02
Tubería p56	105.2	50.8	0.0012	0.21	0.11	0.42	0.037	38.1	0.19	1.62	0.034
Tubería p57	90.93	50.8	0.0012	0.67	0.33	2.97	0.027	38.1	0.59	11.67	0.025
Tubería p58	20.05	50.8	0.0012	0.26	0.13	0.57	0.036	38.1	0.22	2.19	0.033
Tubería p59	78.22	50.8	0.0012	0.31	0.15	0.78	0.034	38.1	0.27	3.03	0.031
Tubería p60	24.37	50.8	0.0012	0.09	0.05	0.06	0.03	38.1	0.08	0.29	0.033
Tubería p61	50.59	50.8	0.0012	0.12	0.06	0.11	0.032	38.1	0.1	0.58	0.041
Tubería p62	114.2	50.8	0.0012	-0.86	0.42	4.62	0.026	38.1	0.76	18.18	0.024
Tubería p63	78.42	50.8	0.0012	0.13	0.07	0.16	0.036	38.1	0.12	0.73	0.039
Tubería p64	27.35	50.8	0.0012	0.34	0.17	0.93	0.033	38.1	0.3	3.6	0.03
Tubería p65	48.33	50.8	0.0012	-1.43	0.7	11.26	0.023	38.1	1.25	44.54	0.021

Tubería p66	72.6	50.8	0.0012	0.07	0.03	0.04	0.04	50.8	0.03	0.04	0.04
Tubería p67	144.8	50.8	0.0012	-0.81	0.4	4.11	0.026	38.1	0.71	16.18	0.024
Tubería p68	87.19	50.8	0.0012	0.43	0.21	1.39	0.031	38.1	0.38	5.43	0.028
Tubería p69	47.97	50.8	0.0012	-0.23	0.12	0.49	0.036	38.1	0.21	1.89	0.033
Tubería p70	178.7	50.8	0.0012	-1.73	0.85	15.85	0.022	76.2	0.38	2.29	0.024
Tubería p71	98.42	50.8	0.0012	0.14	0.07	0.19	0.039	38.1	0	0	6.53
Tubería p72	79.58	50.8	0.0012	-0.02	0.01	0.01	0.128	38.1	0.14	1.01	0.037
Tubería p73	54.41	50.8	0.0012	0.28	0.14	0.66	0.034	38.1	0.25	2.58	0.032
Tubería p74	18.48	50.8	0.0012	0.03	0.01	0.02	0.086	38.1	0.02	0.06	0.071
Tubería p75	41.8	50.8	0.0012	0.19	0.09	0.33	0.039	38.1	0.16	1.26	0.036
Tubería p76	34.7	50.8	0.0012	-0.16	0.08	0.27	0.04	38.1	0.14	1.03	0.037
Tubería p77	47.27	50.8	0.0012	-0.11	0.05	0.08	0.03	38.1	0.09	0.45	0.039
Tubería p78	53.08	50.8	0.0012	0	0	0	0	38.1	0	0	0
Tubería p79	75.02	50.8	0.0012	0.16	0.08	0.26	0.041	38.1	0.14	1.02	0.037
Tubería p80	110.9	76.2	0.0012	0.33	0.07	0.13	0.037	38.1	0.42	6.55	0.028
Tubería p81	97.55	76.2	0.0012	3.31	0.73	7.22	0.02	76.2	0.76	7.82	0.02
Tubería p82	74.48	76.2	0.0012	6.44	1.41	23.75	0.018	76.2	1.41	23.75	0.018
Tubería p83	135.9	76.2	0.0012	-0.57	0.12	0.33	0.032	38.1	0.5	8.79	0.026
Tubería p84	24.55	50.8	0.0012	0.38	0.19	1.1	0.032	38.1	0.09	0.35	0.036
Tubería p85	301.1	50.8	0.0012	0.87	0.43	4.7	0.025	38.1	0.76	18.51	0.024
Tubería p87	426.8	50.8	0.0012	0	0	0	0	38.1	0	0	0
Tubería p88	86.42	50.8	0.0012	-0.26	0.13	0.58	0.035	38.1	0.35	4.8	0.029
Tubería p89	112	50.8	0.0012	0.09	0.04	0.06	0.03	38.1	0.08	0.27	0.032
Tubería p90	104.3	76.2	0.0012	11.96	2.62	72.52	0.016	76.2	2.62	72.51	0.016
Tubería p91	105.6	50.8	0.0012	-0.19	0.09	0.34	0.039	38.1	0.17	1.31	0.036
Tubería p92	115.1	76.2	0.0012	-2.93	0.64	5.81	0.021	76.2	0.61	5.29	0.021
Tubería p93	126.7	76.2	0.0012	0	0	0	0	50.8	0	0	0
Tubería p107	272.7	76.2	0.0012	44.56	9.77	806.75	0.013	76.2	9.77	806.75	0.013
Tubería p19	35.42	101.6	0.0012	-11.96	1.48	18.16	0.017	101.6	1.48	18.16	0.017
Tubería p20	146.15	50.8	0.0012	3.06	1.51	43.73	0.019	50.8	1.51	43.74	0.019
Tubería 1	1	76.2	0.0012	90.21	19.78	3000.08	0.011	76.2	19.78	3000.08	0.011
Tubería 4	2.31	76.2	0.0012	6.44	1.41	23.77	0.018				
Tubería 6	1.73	200	0.1	4.46	0.14	0.09	0.017				
Válvula 3	No Disponible	76.2	No Disponible	6.44	1.41	11.96	0				
Válvula 5	No Disponible	50.8	No Disponible	4.46	2.2	4.85	0				

Tabla 50 Resultados tuberías de la red, no optimizado y optimizado.  
Fuente: autor

En la tabla 51 se presenta un resumen de las modelaciones con el diámetro optimizado comparado con el diámetro de la norma RAS.

Tabla resumen:  
Turmequé

Tramos	Longitud	Diámetro		Velocidad			Presiones			Presión	P trabajo tubería Optimizada
		(mm)		(m/s)		vRAS / vOP	(mca)		pOP / pRAS	Estática	
	(m)	Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000		Con $\Phi$			(mca)	
						Mejorado	RAS 2000	(mca)			
Tubería p2	105.20	76.2	76.2	0.94	0.94	1.00	25.66	25.67	1.00	37.17	112
Tubería p3	90.93	76.2	76.2	0.79	0.79	1.00	24.00	23.99	1.00	35.05	112
Tubería p4	101.50	76.2	76.2	0.51	0.50	0.98	32.57	32.58	1.00	44.01	112
Tubería p5	84.29	76.2	76.2	0.87	0.87	1.00	25.10	25.10	1.00	36.23	112
Tubería p6	115.40	76.2	76.2	0.36	0.36	1.00	28.13	28.13	1.00	39.5	112
Tubería p7		76.2	76.2	0	0.00		10.97	17.75	0.62	49.73	112
Tubería p8	111.10	76.2	76.2	0.24	0.13	0.54	15.45	22.30	0.69	54.32	112
Tubería p9	101.60	76.2	76.2	0.08	0.08	1.00	23.72	30.57	0.78	62.6	112
Tubería p10	130.90	76.2	76.2	0.43	0.43	1.00	36.06	23.99	1.50	50.32	112
Tubería p11	103.10	38.1	76.2	0.49	0.16	0.33	36.78	24.71	1.49	50.66	294
Tubería p12	89.35	76.2	76.2	0.2	0.20	1.00	32.57	32.58	1.00	44.01	112
Tubería p13		76.2	76.2	0	0.00		35.38	23.43	1.51	49.42	112
Tubería p14	102.80	38.1	76.2	0.35	0.12	0.34	56.65	45.87	1.24	71.91	294
Tubería p15	110.90	38.1	76.2	0.08	0.02	0.25	40.38	29.63	1.36	55.67	294
Tubería p16	87.51	76.2	76.2	0.3	0.30	1.00	28.13	28.13	1.00	39.5	112
Tubería p17	78.69	76.2	76.2	0.02	0.02	1.00	23.72	30.57	0.78	62.6	112
Tubería p18	75.47	101.6	101.6	1.86	1.86	1.00	20.42	20.42	1.00	22.51	112
Tubería p21	85.77	50.8	50.8	1.41	1.41	1.00	29.71	29.71	1.00	41.51	112
Tubería p22	40.38	50.8	50.8	1.34	1.34	1.00	29.49	29.49	1.00	42.73	112
Tubería p23	125.54	50.8	50.8	2.2	2.20	1.00	24.85	20.00	1.24	48.88	112
Tubería p24	92.04	38.1	50.8	2.44	1.17	0.48	22.31	28.43	0.78	59.85	294
Tubería p25	105.30	38.1	50.8	0.66	0.47	0.71	30.65	37.70	0.81	69.69	294
Tubería p26	110.80	50.8	50.8	0.95	0.95	1.00	29.49	29.49	1.00	42.73	112
Tubería p27		50.8	50.8	0	0.00		28.13	28.13	1.00	39.5	112
Tubería p28	93.97	31.75	50.8	1.76	0.89	0.51	17.78	20.93	0.85	51.42	294
Tubería p29	90.20	31.75	50.8	1.27	0.70	0.55	23.23	30.54	0.76	62.04	294
Tubería p30	101.20	38.1	50.8	0.63	0.49	0.78	32.20	40.23	0.80	72.33	294
Tubería p31	393.30	31.75	50.8	0.51	0.20	0.39	56.30	67.65	0.83	99.64	294
Tubería p32	92.48	31.75	50.8	0.56	0.15	0.27	23.23	30.54	0.76	62.04	294
Tubería p33	42.09	38.1	50.8	0.25	0.14	0.56	35.78	43.89	0.82	76.02	294
Tubería p34	262.00	31.75	50.8	1	0.39	0.39	40.08	56.81	0.71	89.95	294
Tubería p35	95.15	38.1	50.8	0.58	0.19	0.33	30.65	37.70	0.81	69.69	294

Tubería p36	90.76	50.8	50.8	0.25	0.02	0.08	15.45	22.30	0.69	54.32	112
Tubería p37	189.70	38.1	50.8	0.22	0.12	0.55	18.05	25.36	0.71	57.48	294
Tubería p38	122.90	50.8	50.8	0.65	0.42	0.65	10.97	17.75	0.62	49.73	112
Tubería p39	107.30	38.1	50.8	0	0.00		15.92	15.92	1.00	27.72	294
Tubería p40	121.30	38.1	50.8	1.04	0.62	0.60	30.11	32.89	0.92	45.05	294
Tubería p41	36.42	38.1	50.8	0.08	0.05	0.63	20.24	23.03	0.88	35.19	294
Tubería p42	42.58	38.1	50.8	0.33	0.18	0.55	21.35	24.27	0.88	36.47	294
Tubería p43	40.49	38.1	50.8	0.05	0.03	0.60	16.59	19.52	0.85	31.72	294
Tubería p44	55.35	38.1	50.8	0.14	0.08	0.57	17.01	19.96	0.85	32.18	294
Tubería p45	36.41	38.1	50.8	0.09	0.05	0.56	20.05	22.98	0.87	35.19	294
Tubería p46	86.15	38.1	50.8	0.55	0.35	0.64	33.83	37.24	0.91	49.68	294
Tubería p47	108.70	38.1	50.8	1.4	0.79	0.56	22.03	29.84	0.74	43.76	294
Tubería p48	67.57	38.1	50.8	0.31	0.18	0.58	22.03	29.84	0.74	43.76	294
Tubería p49	117.50	38.1	50.8	1.14	0.60	0.53	32.57	32.58	1.00	44.01	294
Tubería p50	74.36	38.1	50.8	0.97	0.55	0.57	17.14	26.51	0.65	40.97	294
Tubería p51	57.66	38.1	50.8	0.06	0.03	0.50	17.14	26.51	0.65	40.97	294
Tubería p52	62.55	50.8	50.8	1.39	1.39	1.00	36.28	24.33	1.49	52.69	112
Tubería p53	287.20	50.8	50.8	1.29	1.29	1.00	26.22	14.27	1.84	52.16	112
Tubería p54	37.11	50.8	50.8	1.2	1.20	1.00	25.73	13.78	1.87	52.74	112
Tubería p55	435.90	38.1	50.8	1.7	0.96	0.56	10.37	23.47	0.44	70.88	294
Tubería p56	105.20	38.1	50.8	0.19	0.11	0.58	14.44	27.67	0.52	75.12	294
Tubería p57	90.93	38.1	50.8	0.59	0.33	0.56	15.90	32.95	0.48	81.7	294
Tubería p58	20.05	38.1	50.8	0.22	0.13	0.59	17.14	34.23	0.50	82.99	294
Tubería p59	78.22	38.1	50.8	0.27	0.15	0.56	14.49	31.72	0.46	80.53	294
Tubería p60	24.37	38.1	50.8	0.08	0.05	0.63	14.05	31.29	0.45	80.1	294
Tubería p61	50.59	38.1	50.8	0.1	0.06	0.60	13.80	31.05	0.44	79.87	294
Tubería p62	114.20	38.1	50.8	0.76	0.42	0.55	10.57	25.28	0.42	73.23	294
Tubería p63	78.42	38.1	50.8	0.12	0.07	0.58	18.14	32.89	0.55	80.86	294
Tubería p64	27.35	38.1	50.8	0.3	0.17	0.57	10.55	25.33	0.42	73.31	294
Tubería p65	48.33	38.1	50.8	1.25	0.70	0.56	10.37	23.47	0.44	70.88	294
Tubería p66	72.60	50.8	50.8	0.03	0.03	1.00	37.71	25.76	1.46	54.12	112
Tubería p67	144.80	38.1	50.8	0.71	0.40	0.56	23.74	9.24	2.57	38.41	294
Tubería p68	87.19	38.1	50.8	0.38	0.21	0.55	24.36	10.22	2.38	39.51	294
Tubería p69	47.97	38.1	50.8	0.21	0.12	0.57	23.74	9.24	2.57	38.41	294
Tubería p70	178.70	76.2	50.8	0.38	0.85	2.24	36.06	23.99	1.50	50.32	112
Tubería p71	98.42	38.1	50.8	0	0.07		59.76	48.97	1.22	75.02	294
Tubería p72	79.58	38.1	50.8	0.14	0.01	0.07	52.34	41.47	1.26	67.52	294
Tubería p73	54.41	38.1	50.8	0.25	0.14	0.56	35.57	24.08	1.48	53.92	294
Tubería p74	18.48	38.1	50.8	0.02	0.01	0.50	39.13	27.64	1.42	57.48	294
Tubería p75	41.80	38.1	50.8	0.16	0.09	0.56	30.58	19.12	1.60	48.98	294
Tubería p76	34.70	38.1	50.8	0.14	0.08	0.57	26.22	14.27	1.84	52.16	294

Tubería p77	47.27	38.1	50.8	0.09	0.05	0.56	25.73	13.78	1.87	52.74	294
Tubería p78	53.08	38.1	50.8	0	0.00		17.99	17.99	1.00	26.47	294
Tubería p79	75.02	38.1	50.8	0.14	0.08	0.57	38.91	42.37	0.92	54.83	294
Tubería p80	110.90	38.1	76.2	0.42	0.07	0.17	45.90	34.66	1.32	60.66	294
Tubería p81	97.55	76.2	76.2	0.76	0.73	0.96	35.38	23.43	1.51	49.42	112
Tubería p82	74.48	76.2	76.2	1.41	1.41	1.00	29.96	17.95	1.67	43.23	112
Tubería p83	135.90	38.1	76.2	0.5	0.12	0.24	23.78	11.04	2.15	40.8	294
Tubería p84	24.55	38.1	50.8	0.09	0.19	2.11	29.64	36.65	0.81	68.67	294
Tubería p85	301.10	38.1	50.8	0.76	0.43	0.57	12.55	26.09	0.48	41.96	294
Tubería p87	426.80	38.1	50.8	0	0.00		47.89	35.15	1.36	64.91	294
Tubería p88	86.42	38.1	50.8	0.35	0.13	0.37	45.90	34.66	1.32	60.66	294
Tubería p89	112.00	38.1	50.8	0.08	0.04	0.50	15.20	28.45	0.53	75.91	294
Tubería p90	104.30	76.2	76.2	2.62	2.62	1.00	22.65	22.65	1.00	32.95	112
Tubería p91	105.60	38.1	50.8	0.17	0.09	0.53	25.10	25.10	1.00	36.23	294
Tubería p92	115.10	76.2	76.2	0.61	0.64	1.05	29.96	17.95	1.67	43.23	112
Tubería p93		50.8	76.2	0	0.00		26.98	15.38	1.75	45.19	112
Tubería p107	272.70	76.2	76.2	9.77	9.77	1.00	1.00	1.00	1.00	1	112
Tubería p19	35.42	101.6	101.6	1.48	1.48	1.00	20.42	20.42	1.00	22.51	112
Tubería p20	146.15	50.8	50.8	1.51	1.51	1.00	18.95	18.95	1.00	27.43	112
Válvula 3	1.00	0	76.2	0	1.41		#N/A	#N/A	#N/A	0	0
Válvula 5	1.00	0	50.8	0	2.20		#N/A	#N/A	#N/A	0	0

Tabla 51 Comparación de resultados diámetro optimizado vs diámetro RAS.

Fuente: autor.

En la tabla 52 se presenta la comparación de precios de tubería, calculado con el diámetro optimizado y el diámetro de la norma RAS.

Tramos	Longitud	Costos			
		(\$/ml)		Totales	
	(m)	Con $\phi$		Con $\phi$	
		Mejorado	RAS 2000	Mejorado	RAS 2000
Tubería p2	105.20	\$22,252	\$22,252	\$2,340,910	\$2,340,910
Tubería p3	90.93	\$22,252	\$22,252	\$2,023,374	\$2,023,374
Tubería p4	101.50	\$22,252	\$22,252	\$2,258,578	\$2,258,578
Tubería p5	84.29	\$22,252	\$22,252	\$1,875,621	\$1,875,621
Tubería p6	115.40	\$22,252	\$22,252	\$2,567,881	\$2,567,881
Tubería p7	0.00	\$22,252	\$22,252	\$0	\$0
Tubería p8	111.10	\$22,252	\$22,252	\$2,472,197	\$2,472,197
Tubería p9	101.60	\$22,252	\$22,252	\$2,260,803	\$2,260,803
Tubería p10	130.90	\$22,252	\$22,252	\$2,912,787	\$2,912,787
Tubería p11	103.10	\$12,155	\$22,252	\$1,253,181	\$2,294,181
Tubería p12	89.35	\$22,252	\$22,252	\$1,988,216	\$1,988,216

Tubería p13	0.00	\$22,252	\$22,252	\$0	\$0
Tubería p14	102.80	\$12,155	\$22,252	\$1,249,534	\$2,287,506
Tubería p15	110.90	\$12,155	\$22,252	\$1,347,990	\$2,467,747
Tubería p16	87.51	\$22,252	\$22,252	\$1,947,273	\$1,947,273
Tubería p17	78.69	\$22,252	\$22,252	\$1,751,010	\$1,751,010
Tubería p18	75.47	\$32,346	\$32,346	\$2,441,153	\$2,441,153
Tubería p21	85.77	\$14,846	\$14,846	\$1,273,341	\$1,273,341
Tubería p22	40.38	\$14,846	\$14,846	\$599,481	\$599,481
Tubería p23	125.54	\$14,846	\$14,846	\$1,863,767	\$1,863,767
Tubería p24	92.04	\$12,155	\$14,846	\$1,118,746	\$1,366,426
Tubería p25	105.30	\$12,155	\$14,846	\$1,279,922	\$1,563,284
Tubería p26	110.80	\$14,846	\$14,846	\$1,644,937	\$1,644,937
Tubería p27	0.00	\$14,846	\$14,846	\$0	\$0
Tubería p28	93.97	\$10,748	\$14,846	\$1,009,990	\$1,395,079
Tubería p29	90.20	\$10,748	\$14,846	\$969,470	\$1,339,109
Tubería p30	101.20	\$12,155	\$14,846	\$1,230,086	\$1,502,415
Tubería p31	393.30	\$10,748	\$14,846	\$4,227,188	\$5,838,932
Tubería p32	92.48	\$10,748	\$14,846	\$993,975	\$1,372,958
Tubería p33	42.09	\$12,155	\$14,846	\$511,604	\$624,868
Tubería p34	262.00	\$10,748	\$14,846	\$2,815,976	\$3,889,652
Tubería p35	95.15	\$12,155	\$14,846	\$1,156,548	\$1,412,597
Tubería p36	90.76	\$14,846	\$14,846	\$1,347,423	\$1,347,423
Tubería p37	189.70	\$12,155	\$14,846	\$2,305,804	\$2,816,286
Tubería p38	122.90	\$14,846	\$14,846	\$1,824,573	\$1,824,573
Tubería p39	107.30	\$12,155	\$14,846	\$1,304,232	\$1,592,976
Tubería p40	121.30	\$12,155	\$14,846	\$1,474,402	\$1,800,820
Tubería p41	36.42	\$12,155	\$14,846	\$442,685	\$540,691
Tubería p42	42.58	\$12,155	\$14,846	\$517,560	\$632,143
Tubería p43	40.49	\$12,155	\$14,846	\$492,156	\$601,115
Tubería p44	55.35	\$12,155	\$14,846	\$672,779	\$821,726
Tubería p45	36.41	\$12,155	\$14,846	\$442,564	\$540,543
Tubería p46	86.15	\$12,155	\$14,846	\$1,047,153	\$1,278,983
Tubería p47	108.70	\$12,155	\$14,846	\$1,321,249	\$1,613,760
Tubería p48	67.57	\$12,155	\$14,846	\$821,313	\$1,003,144
Tubería p49	117.50	\$12,155	\$14,846	\$1,428,213	\$1,744,405
Tubería p50	74.36	\$12,155	\$14,846	\$903,846	\$1,103,949
Tubería p51	57.66	\$12,155	\$14,846	\$700,857	\$856,020
Tubería p52	62.55	\$14,846	\$14,846	\$928,617	\$928,617
Tubería p53	287.20	\$14,846	\$14,846	\$4,263,771	\$4,263,771
Tubería p54	37.11	\$14,846	\$14,846	\$550,935	\$550,935
Tubería p55	435.90	\$12,155	\$14,846	\$5,298,365	\$6,471,371

Tubería p56	105.20	\$12,155	\$14,846	\$1,278,706	\$1,561,799
Tubería p57	90.93	\$12,155	\$14,846	\$1,105,254	\$1,349,947
Tubería p58	20.05	\$12,155	\$14,846	\$243,708	\$297,662
Tubería p59	78.22	\$12,155	\$14,846	\$950,764	\$1,161,254
Tubería p60	24.37	\$12,155	\$14,846	\$296,217	\$361,797
Tubería p61	50.59	\$12,155	\$14,846	\$614,921	\$751,059
Tubería p62	114.20	\$12,155	\$14,846	\$1,388,101	\$1,695,413
Tubería p63	78.42	\$12,155	\$14,846	\$953,195	\$1,164,223
Tubería p64	27.35	\$12,155	\$14,846	\$332,439	\$406,038
Tubería p65	48.33	\$12,155	\$14,846	\$587,451	\$717,507
Tubería p66	72.60	\$14,846	\$14,846	\$1,077,820	\$1,077,820
Tubería p67	144.80	\$12,155	\$14,846	\$1,760,044	\$2,149,701
Tubería p68	87.19	\$12,155	\$14,846	\$1,059,794	\$1,294,423
Tubería p69	47.97	\$12,155	\$14,846	\$583,075	\$712,163
Tubería p70	178.70	\$22,252	\$14,846	\$3,976,432	\$2,652,980
Tubería p71	98.42	\$12,155	\$14,846	\$1,196,295	\$1,461,143
Tubería p72	79.58	\$12,155	\$14,846	\$967,295	\$1,181,445
Tubería p73	54.41	\$12,155	\$14,846	\$661,354	\$807,771
Tubería p74	18.48	\$12,155	\$14,846	\$224,624	\$274,354
Tubería p75	41.80	\$12,155	\$14,846	\$508,079	\$620,563
Tubería p76	34.70	\$12,155	\$14,846	\$421,779	\$515,156
Tubería p77	47.27	\$12,155	\$14,846	\$574,567	\$701,770
Tubería p78	53.08	\$12,155	\$14,846	\$645,187	\$788,026
Tubería p79	75.02	\$12,155	\$14,846	\$911,868	\$1,113,747
Tubería p80	110.90	\$12,155	\$22,252	\$1,347,990	\$2,467,747
Tubería p81	97.55	\$22,252	\$22,252	\$2,170,683	\$2,170,683
Tubería p82	74.48	\$22,252	\$22,252	\$1,657,329	\$1,657,329
Tubería p83	135.90	\$12,155	\$22,252	\$1,651,865	\$3,024,047
Tubería p84	24.55	\$12,155	\$14,846	\$298,405	\$364,469
Tubería p85	301.10	\$12,155	\$14,846	\$3,659,871	\$4,470,131
Tubería p87	426.80	\$12,155	\$14,846	\$5,187,754	\$6,336,273
Tubería p88	86.42	\$12,155	\$14,846	\$1,050,435	\$1,282,991
Tubería p89	112.00	\$12,155	\$14,846	\$1,361,360	\$1,662,752
Tubería p90	104.30	\$22,252	\$22,252	\$2,320,884	\$2,320,884
Tubería p91	105.60	\$12,155	\$14,846	\$1,283,568	\$1,567,738
Tubería p92	115.10	\$22,252	\$22,252	\$2,561,205	\$2,561,205
Tubería p93	0.00	\$14,846	\$22,252	\$0	\$0
Tubería p107	272.70	\$22,252	\$22,252	\$6,068,120	\$6,068,120
Tubería p19	35.42	\$32,346	\$32,346	\$1,145,695	\$1,145,695
Tubería p20	146.15	\$14,846	\$14,846	\$2,169,743	\$2,169,743
Válvula 3 Reductora	1.00	\$0	\$9,413,466	\$0	\$9,413,466

Válvula 5 Reductora	1.00	\$0	\$6,492,961	\$0	\$6,492,961
TOTAL				\$135,727,912	\$171,903,329

*Tabla 52 Costos totales de tubería, comparando diámetros optimizados con norma RAS.  
Fuente: autor*

En las tablas de comparación de resultados, se observa que:

Cuando se realiza la modelación con los diámetros optimizados, las velocidades aumentan, comparadas con las modelaciones realizadas con los diámetros mínimos de la norma RAS. Este aumento se da por la reducción en el área de la tubería.

Como los caudales de diseño son pequeños, al modelar con los diámetros mínimos exigidos en la norma RAS, no es posible alcanzar, en muchos casos, la velocidad mínima exigida; cuando modelamos con el diámetro optimizado, este incremento de velocidad, es favorable para el sistema, ya que estas aumentan y en algunos casos se logra el valor de velocidad mínimo exigido por la norma RAS.

Cuando modelamos con los diámetros optimizados, las presiones disminuyen, respecto a las obtenidas con los modelaciones realizadas con los diámetros mínimos exigidos en la norma RAS. Esta disminución se da por el aumento en las perdidas de energía.

Esta disminución de presión fue controlada durante la optimización para evitar que algunos nodos obtuvieran presiones mínimas a las exigidas.

No obstante, este aspecto es favorable en los casos en que las conducciones o las redes de distribución presentan presiones elevadas, producto la topografía. Este caso se dio en el municipio de Turmequé, donde el terreno es bastante escarpado. En este caso en particular, al modelar la red con los diámetros mínimos exigidos en la norma, hubo la necesidad de instalar válvulas reductoras de presión, estructuras que fueron omitidas cuando se realizó la modelación con los diámetros optimizados, lo que favorece en aspecto de mantenimiento, operación y por consiguiente en el económico.

En cuanto al factor económico, se observan reducciones de costo entre un 20% a un 60%, dando la posibilidad de que esas ahorros sean reinvertidos, preferiblemente, en otros componentes del sistema de acueducto. Al analizar este factor con la información contenida en la tabla 24, se puede estimar que los ahorros serían considerables.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De este estudio se obtienen conclusiones de tipo técnico, financiero y administrativo.

Entre las conclusiones técnicas las más representativas son las siguientes:

1. Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica de costo mínimo de la red, con base en la determinación de los diámetros de los conductos, permite concluir que la velocidad en la tubería aumenta sin sobrepasar la velocidad máxima establecida en la norma, teniendo en cuenta que los diámetros seleccionados son más pequeños que los mínimos establecidos por la norma. Sin embargo la presión en los nudos disminuye pero sigue siendo mayor que la presión mínima también establecida.
2. La comparación entre los resultados de la modelación para los diámetros mínimos exigidos en la norma y la de costo mínimo permite concluir:
  - a) Debido a que los caudales de la red son muy pequeños, algunos tramos de las redes estudiadas presentan velocidades inferiores a la mínima exigida en la norma, cuando se utilizan los diámetros mínimos exigidos en la norma. En la modelación hidráulica de costo mínimo, las velocidades aumentaron y se aproximaron más a las velocidades mínimas exigidas.
  - b) Las presiones obtenidas en los nodos de las redes mediante la modelación hidráulica optimiza son menores que las presiones obtenidas utilizando los diámetros mínimos exigidos en la norma; sin embargo, estas presiones siguen siendo mayores que las presiones mínimas exigidas en la norma, y en algunos casos se llegó a ésta.
  - c) Generalmente cuando por las condiciones topográficas las presiones en las tuberías de conducción o en las tuberías de redes de distribución las presiones superan la presión admisible de la tubería o la máxima exigida en la norma, la solución es mejorar la presión de trabajo de la tubería o instalar cámaras de quiebre o válvulas reductoras de presión. Cuando se realiza el diseño de los sistemas utilizando el diseño de costo mínimo, las presiones experimentan una reducción significativa con lo cual es posible prescindir este tipo de alternativas.
3. Desde el punto de vista económico, la reducción de los diámetros mínimos establecidos en la norma de la tubería y accesorios de la red de distribución así

como la infraestructura complementaria reducen el costo de la conducción y redes del sistema entre un 20 y 60. Esto se explica, porque la mano de obra de instalación, los costos de mantenimiento, los suministros, de acuerdo con la ley del mercado tienen un menor costo.

Una significativa disminución en los costos de suministro e instalación de tuberías de redes de distribución le permitiría a los municipios de nivel de complejidad bajo y medio, la reasignación de recursos dentro del sector de acueducto y alcantarillado con el fin de ampliar la cobertura, mejorar la calidad del agua para consumo, mejorar tratamiento de aguas residuales, etc.

Así mismo, es pertinente resaltar que el número de poblaciones de baja y media complejidad en las que se podrían aplicar estos cambios corresponden a cerca del 64% de los municipios del país, es decir 705 municipios.

Se recomienda que la norma RAS permita la utilización de diámetros menores a los establecidos, previa justificación y demostración, principalmente en los siguientes casos:

- a) En sectores de la población donde el POT no prevea expansiones ya que no se presentaran incremento en los caudales de diseño.
- b) En sectores de la red o de la conducción con presiones superiores a la máxima admisible.
- c) En el caso de redes existentes con diámetros menores que los establecidos en la norma RAS, se recomienda que estos diámetros se mantengan si las presiones resultantes están dentro del rango establecido en la norma

## **ANEXOS**

Anexo No 1. Resolución 1096 de 17 de noviembre de 2.000 – RAS 2.000, títulos A y B. (Archivo digital).

Anexo No 2. Resolución 622 de 27 de noviembre de 2015. De la Unidad Administrativa de la Contaduría General de Nación. (Archivo digital).

Anexo No 3. Categorización municipios año 2015. Contaduría General de la Nación. (Archivo digital).

Anexo No 4. IRCA 2015. Instituto Nacional de Salud. (Archivo digital).

Anexo No 5. Informe nacional de monitoreo uso y ejecución de los recursos del sistema general de participaciones para agua potable y saneamiento básico (SGP-APSB), vigencia 2014. Ministerio de vivienda ciudad y territorio. (Archivo digital)

Anexo No 6. Cuadros censo 2005. DANE. (Archivo digital).

Anexo No 7. Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2320 de 2009.

## BIBLIOGRAFIA

1. Insfopal (1977). Guías para presentación, diagnóstico y diseño de sistemas de acueducto.
2. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3455>.
3. <https://www.redjurista.com/documents/rl082298.aspx>.
4. Romero, J. (1996). *Acuipurificación*, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. Resolución 1096 del 2000, RAS 2000, Título B. Sistemas de Acueducto. MVDT (2012).
6. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. Resolución 1096 del 2000, RAS 2000, Título A. Sistemas de Acueducto. MVDT (2012).
7. López, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
8. Fair, Geyer & Okun (1996). *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*, vol I. México: Editorial Limusa.
9. White, F. (2004). *Mecánica de fluidos*. Madrid: Editorial McGraw-Hill.
10. Ministerio de Hacienda y Credito Público. Ley 617 de 2000, (en línea), noviembre 2015. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=3771>.
11. Informe de viabilidad financiera del departamento de Boyacá. <http://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2014/05/BOYACA-VIABILIDAD-FISCAL-2013-2.pdf>.
12. Secretaría de Planeación de Cundinamarca. Categorización de los municipios. (en línea), noviembre 2015. <http://www.cundinamarca.gov.co/wps/wcm/connect/c61aa01f-469f-4b26-9693-1b0f4c4c102e/Categorizacion-Municipios-SecPlaneaci%C3%B3n.pdf?MOD=AJPERES>.
13. Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2320 de 2009. (en línea), octubre 2015.

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisiur/normas/Norma1.jsp?i=38487>.

14. Alean Suárez (2002). Análisis de la metodología de costo mínimo de expansiones de capacidad. Bogotá: Universidad de los Andes.
15. Contaduría General de La Nación. (en línea), octubre 2015.  
[http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB\\_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz](http://www.contaduria.gov.co/wps/portal/internetes!/ut/p/b1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOINzPyDTEPdQoM9zX2MDTyDAoJdAkPNjY3CTIAKIkEKcABHA7z6g-D6cShwMyLSfuwKnL3NKdIPciAB_X4e-bmp-gW5oaGhEeWKAACWLNsl/dl4/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmtFL1o2XzMwNDAwOEJSNkw1TDgwSVJHRks2M1ZIOEEz)
16. Rodríguez, M.L. (2013). Planes departamentales de los acueductos en Colombia, tesis de grado para obtener el título de Maestría en Ingeniería en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
17. PDA Antioquia. (en línea) noviembre 2015.  
<http://www.pdaantioquia.com/proyectos/mapa.html>.
18. PDA Boyaca. (en línea) noviembre 2015.  
<http://espb.gov.co/espb/images/stories/RevistaESPB/revista%20ESPB2.pdf>.
19. PDA Cundinamarca (en línea) noviembre 2015.  
<http://www.epc.com.co/docs/INFORME%20DE%20GESTION%202012-2016%20EPC.pdf>.
20. PDA Nariño. (en línea) noviembre 2015.  
<http://plandeaguas.xn--nario-rta.gov.co/images/Informe%20Bimensual%20%20mayo-junio%202015%20PAP-PDA%20NARIO.pdf>.
21. Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial. Informe nacional de monitoreo, uso y ejecución de los recursos del sistema general de participaciones para agua potable y saneamiento básico (SGP - APSB), vigencia 2014,  
<http://www.minvivienda.gov.co/Lists/InformesSGP/Attachments/7/Informe%20monitoreo%20SGP-APSB%20vigencia%202014.pdf>.