

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería  
Ambiental

“Diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños y  
elaboración de una propuesta de diseño”

Krista María Salazar Quesada

Cartago, 2017

**“Diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños y elaboración de una propuesta de diseño”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

**Miembros del tribunal**



**M.Sc. Jorge Calvo Gutiérrez**  
Director



**Lic. Atahualpa Pérez Coto**  
Lector 1



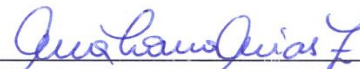
**Lic. Laura Ureña Vargas**  
Lector 2



**M.Sc. Diana Zambrano Piamba**  
Coordinadora COTRAFIG



**Ph.D. Floria Roa Gutiérrez**  
Directora Escuela de Química



**M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga**  
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

## **DEDICATORIA**

A mi mamá, por ser la mejor y más dulce persona.

A mi hermano, por ser la mayor bendición de mi vida.

A mi papá, por enseñarme a ser perseverante y a luchar.

A Jose, por ser mi luz, mi roca y por creer en mí siempre.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Jorge Calvo, mi profesor tutor, por todo su apoyo y por siempre tener la mejor disposición para ayudar.

A Fernando Watson, Andrés Araya y Macario Pino, por la ayuda brindada durante el proceso de elaboración del TFG.

Al personal del Programa de Abastecimiento de Agua de la Escuela de Ingeniería en Construcción por las capacitaciones dadas sobre manejo de equipos y por el acompañamiento en las mediciones de campo.

Al personal de Ciudad de los Niños por su disposición a ayudar, especialmente a Ernesto y Nancy por su gran amabilidad y apoyo.

A mis personas cercanas por siempre estar ahí, por todo el apoyo y cariño que me brindaron en este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>OBJETIVOS.....</i>	2
1.1.1	Objetivo general .....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
<b>2</b>	<b>MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>3</b>
2.1	<i>GENERALIDADES DE TOPOGRAFÍA .....</i>	3
2.1.1	Sistemas Globales de Navegación por Satélite.....	3
2.1.2	Métodos convencionales de levantamiento .....	4
2.2	<i>SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.....</i>	5
2.2.1	Requerimientos de uso de agua .....	5
2.2.2	Fuentes de obtención de agua.....	5
2.2.3	Tanques de almacenamiento de agua .....	6
2.2.4	Obras de conducción y aducción de agua.....	11
2.2.5	Red de distribución de agua .....	12
2.3	<i>MODELAMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN .....</i>	14
2.3.1	Modelación con CivilCAD.....	14
2.3.2	Modelamiento con WaterGEMS .....	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
3.1	<i>DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ACTUAL.....</i>	20
3.1.1	Aplicaciones de topografía.....	20
3.1.2	Aplicación de un instrumento de inspección .....	22
3.1.3	Pruebas del nivel en los tanques de almacenamiento.....	22
3.2	<i>MODELACIÓN DE TUBERÍAS EXISTENTES CON CIVILCAD .....</i>	23
3.2.1	Modelación de tuberías existentes con CivilCAD.....	24
3.2.2	Obtención de información necesaria .....	25
3.2.3	Calibración del modelo.....	26
3.3	<i>PROPUESTA DE DISEÑO UTILIZANDO WATERGEMS .....</i>	26
3.3.1	Obtención de información .....	27
3.3.2	Trazado de tuberías.....	29
3.3.3	Establecimiento de escenarios .....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>31</b>
4.1	<i>DESCRIPCIÓN DEL SITIO .....</i>	31

4.2	<i>DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO</i> .....	32
4.3	<i>DIAGNÓSTICO DEL ACUEDUCTO</i> .....	34
4.3.1	Obras de captación .....	35
4.3.2	Tanques de almacenamiento.....	37
4.3.3	Obras para el transporte de agua .....	42
4.4	<i>PROPUESTA DE DISEÑO DEL ACUEDUCTO</i> .....	52
4.4.1	Parámetros básicos .....	52
4.4.2	Estimación de la demanda .....	53
4.4.3	Caudales de diseño .....	55
4.4.4	Estimación de volúmenes .....	56
4.4.5	Ubicación de estructuras.....	57
4.5	<i>TRAZADO DE TUBERÍAS</i> .....	62
4.6	<i>ESCENARIOS DE MODELACIÓN DEL ACUEDUCTO</i> .....	63
4.6.1	Funcionamiento normal.....	64
4.6.2	Escenarios de arranque del sistema .....	74
4.6.3	Escenarios para emergencias .....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>APÉNDICES</b> .....	<b>88</b>
	<b>APÉNDICE 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO DURANTE LOS PROCESOS DE MEDICIÓN TOPOGRÁFICA Y DIAGNÓSTICO DEL ACUEDUCTO</b> .....	<b>89</b>
	<b>APÉNDICE 2. LLENADO DEL FORMULARIO DE INSPECCIÓN SANITARIA</b> .....	<b>91</b>
	<b>APÉNDICE 3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN TUBERÍAS REALIZADA EN CIVILCAD</b> .....	<b>95</b>
	<b>APÉNDICE 4. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PROPUESTA DE DISEÑO REALIZADA EN WATERGEMS</b> .....	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>103</b>
	<b>ANEXO 1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS UTILIZADAS EN CDN</b> .....	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Hidrograma de consumo de una población menor a 2000 habitantes. Fuente: (Magne,2008) .....	8
Figura 2.2 Curva masa para un suministro de 24 horas. Adaptación de (Magne, 2008).....	10
Figura 2.3 Características de rendimiento de una bomba centrífuga funcionando a velocidad constante. Adaptación de (Shammas & Wang, 2016).....	12
Figura 2.4 Distribución de caudal de las unidades de alimentación indicadas.....	15
Figura 3.1 Esquema metodológico para la elaboración del diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua actual. ....	20
Figura 3.2 Esquema metodológico para la modelación de tuberías actuales de CDN .....	24
Figura 3.3 Ejemplo de ordenamiento de líneas de tubería templo para facilitar la interpretación por parte de CivilCAD .....	24
Figura 3.4 Ejemplo de un segmento de la modelación en CivilCAD realizada para la tubería templo .....	26
Figura 3.5 Esquema metodológico para la propuesta de diseño realizada mediante WaterGEMS .....	27
Figura 4.1 Ubicación de la Ciudad de los Niños. ....	32
Figura 4.2 Mapa del sistema de abastecimiento de agua de consumo de CDN .....	33
Figura 4.3 Mapa de riesgos potenciales en la Ciudad de los Niños .....	34
Figura 4.4 Cobertura del suelo en Ciudad de los Niños .....	35
Figura 4.5 Variación de nivel en el tanque de almacenamiento principal.....	39
Figura 4.6 Variación de caudal en el tanque de almacenamiento principal .....	40
Figura 4.7 Variación del caudal de suministro en Ciudad de los Niños durante un día.....	41
Figura 4.8. Variación de nivel en el tanque de almacenamiento secundario.....	42
Figura 4.9 Tramos de tubería modelados en CivilCAD .....	43
Figura 4.10 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería PP-TAP realizada en CivilCAD.....	44
Figura 4.11 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería TM-TAP realizada en CivilCAD .....	46
Figura 4.12 Longitud total de los tramos de tubería de la red de distribución en estudio....	47

Figura 4.13 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería principal realizada en CivilCAD .....	48
Figura 4.14 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería talleres realizada en CivilCAD.....	50
Figura 4.15 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería templo realizada en CivilCAD .....	51
Figura 4.16 Curva de variación horaria de demanda.....	55
Figura 4.17 Curva de masa del tanque de almacenamiento principal .....	56
Figura 4.18 Curva del sistema y de la bomba requerida para el pozo principal.....	61
Figura 4.19 Curva del sistema y de la bomba requerida para abastecer al tanque de almacenamiento .....	61
Figura 4.20 Mapa de la distribución de estructuras para la propuesta de diseño .....	62
Figura 4.21 Esquema del sistema de abastecimiento propuesto.....	63
Figura 4.22 Niveles de agua del tanque de almacenamiento principal para.....	64
Figura 4.23 Mapa de cumplimiento de velocidad en tuberías y presión en nodos del modelo .....	65
Figura 4.24 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación realizada en WaterGEMS.....	66
Figura 4.25 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las velocidades obtenidas mediante la modelación realizada en WaterGEMS .....	67
Figura 4.26 Caudal de suministro ofrecido por el acueducto municipal .....	68
Figura 4.27 Caudal suministrado por el pozo principal y periodos de bombeo .....	69
Figura 4.28 Caudal suministrado por la bomba que abastece al tanque de almacenamiento y sus periodos de bombeo.....	69
Figura 4.29 Variación de nivel de agua en el tanque de almacenamiento.....	70
Figura 4.30 Variación de caudal en el tanque de almacenamiento .....	71
Figura 4.31 Variación de caudal y de niveles de agua en el tanque de reunión.....	72
Figura 4.32 Variación de presión en los nodos con valores mínimos y máximos alcanzados .....	73
Figura 4.33 Variación de velocidad en las tuberías con valores mínimos y máximos alcanzados.....	73



Figura 4.34 Variación de velocidad en las tuberías que cuentan con valores mínimos y máximos alcanzados en el escenario de arranque .....	74
Figura 4.35 Variación de presión en los nodos que cuentan con valores mínimos y máximos alcanzados en el escenario de arranque .....	75
Figura 4.36 Variación de nivel en los tanques durante el arranque del sistema en tiempo lectivo .....	76
Figura 4.37 Variación de nivel en los tanques durante el arranque del sistema en tiempo no lectivo .....	76
Figura 4.38 Niveles de agua en el TR en la modelación de la atención de incendio en la madrugada .....	77
Figura 4.39 Niveles de agua en el TR durante la modelación en la atención de incendio en la noche.....	78
Figura 4.40 Variación de velocidad y presión de entrega de agua en el hidrante. ....	79

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1 Hidrograma de consumo de una población menor a 2000 habitantes. ....	9
Cuadro 2.2 Elementos comunes en modelamiento de redes de distribución de agua .....	18
Cuadro 3.1 Coordenadas geográficas del mojón PC1 .....	21
Cuadro 4.1 Abreviatura de algunos de los elementos del acueducto de CDN .....	33
Cuadro 4.2 Ubicación geográfica de las fuentes de captación de agua en CDN .....	36
Cuadro 4.3 Ubicación geográfica de los tanques de almacenamiento de CDN .....	38
Cuadro 4.4 Población de animales en Ciudad de los Niños .....	53
Cuadro 4.5 Dotación mínima para los usos de agua en CDN. Adaptado de (IMN, 2004)...	54
Cuadro 4.6 Caudales de diseño .....	55
Cuadro 4.7 Volúmenes de reserva y regulación .....	57
Cuadro 4.8 Niveles del tanque de almacenamiento.....	58
Cuadro 4.9 Niveles del tanque de reunión.....	59
Cuadro 4.10 Niveles del tanque de reserva .....	60
Cuadro 4.11 Nombre de nodos en estudio conforme al edificio más cercano .....	65

## **LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS**

CDN	Ciudad de los Niños
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
AyA	Instituto de Alcantarillados y Acueductos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite
AMC	Acueducto Municipal de Cartago
PAA	Programa de Abastecimiento de Agua
PVC	Policloruro de Vinilo

## **RESUMEN**

Los sistemas de abastecimiento de agua de consumo no mejorados constituyen un riesgo para la salud del consumidor, el primer paso para la mejora de un sistema de abastecimiento de agua es garantizar que su funcionamiento sea adecuado en cantidad, presión y continuidad. El diagnóstico realizado a estos sistemas permite conocer las condiciones reales de cada uno de los elementos que lo conforman, con el fin de tomar decisiones importantes para la realización de mejoras. El acueducto en estudio es propio y administrado por Ciudad de los Niños. Su diagnóstico requirió del levantamiento topográfico del sistema de abastecimiento de agua, simulaciones con CivilCAD, pruebas de nivel en los tanques de almacenamiento y el uso de una herramienta de inspección sanitaria de acueductos elaborada por el AyA. La propuesta de diseño se realizó mediante el uso de WaterGEMS, creando escenarios para conocer su comportamiento ante diferentes situaciones. El diagnóstico indicó que el sistema de abastecimiento actual no es eficiente en términos hidráulicos, no cumple con los valores establecidos por el AyA y los elementos que lo componen poseen altos niveles de riesgo. La modelación indicó que el caudal de suministro es insuficiente para garantizar la adecuada operación del acueducto, sin embargo, el sistema propuesto en su modelación cumple con la normativa referente.

**Palabras clave:** Sistema de abastecimiento de agua, modelación, WaterGEMS.

## **ABSTRACT**

Unimproved systems of water supply constitute a risk for the consumers health. The first step to ensure the improvement of water supply system is to guarantee that its operation is adequate En quantity, pressure and velocity with the objective of making important decisions to improve water supply systems, the performed diagnostic allows to know the real conditions of each of the system elements. The aqueduct En study is owned and administered by Ciudad de los Niños. The diagnostic required topographic survey, computer simulations with CivilCAD, level test En the storage tanks and sanitary inspection of the aqueduct through the use of AyA instruments. The design proposal was carried at based of WaterGEMS, creating scenarios to know the behaviors En deaffereents situations. The diagnostic stated that the current supply system is not hydraulically efficient because it does not fulfil AyA established values and the composed elements possess high risk levels. The modeling indicated that the supply flow is insufficient to guarantee the adequate aqueduct operations. However, the proposed system En its modeling fulfils the concerning regulations.

**Keywords:** Water supply system, modeling, WaterGEMS

## **1 INTRODUCCIÓN**

El 99,2% de la población costarricense que cuenta con servicio de agua, utiliza fuentes mejoradas de agua para consumo. Se considera que el agua no mejorada corresponde a aquella que es consumida por hogares o comunidades que utilizan pozos o manantiales no protegidos como fuente de abastecimiento de agua (UNICEF, MICS, & Ministerio de Salud, 2011).

Costa Rica cuenta con un 98,1% de cobertura de agua para consumo, mediante acueductos que abastecen los hogares por medio de tuberías y administrados por diferentes entes operadores. Los operadores privados abarcan el 5,5% de la cobertura total del servicio de agua en el país (Mora, Portuguez, & Mora, 2012). Los acueductos privados están sujetos a las regulaciones del MINAE para el aprovechamiento de las aguas, al Ministerio de Salud respecto a la potabilidad del agua de consumo y al AyA en cuanto al control técnico para asegurar la prestación del servicio (Espinoza, Morera, Mora, & Torres, 2004).

Desde el 2016, el AyA cuenta con la Norma Técnica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Sistema Pluvial. El cual establece requisitos técnicos generales aplicables al diseño o modelación de los sistemas de abastecimiento de agua potable, orientando al profesional para la ejecución de proyectos que posteriormente podrán ser revisados y aprobados por el AyA. También creó en el 2005 el Manual de Procedimientos para de la Categoría de Entes Operadores, con el fin de promover el mejoramiento de las estructuras del sistema de abastecimiento de agua, de manera que éstas brinden a la población de consumo la mejor calidad de agua.

Debido a la complejidad de los métodos matemáticos para el cálculo y análisis de las redes de distribución de agua, se han creado herramientas computacionales que resuelven ecuaciones no lineales para la estimación de valores de velocidad y presión en tuberías de distribución. La elección de la herramienta de cálculo depende de las necesidades del modelado y de la cantidad de información con la que se cuente para realizar una simulación adecuada (Mays, 1999).

Ciudad de los Niños cuenta con un acueducto que se caracteriza por tener altos porcentajes de riesgo sanitario e ineficiencia en términos de conducción y distribución del agua. Tras un levantamiento de información básica y necesaria para la realización de simulaciones del acueducto, se eligió CivilCAD para el análisis hidráulico del sistema de abastecimiento actual bajo una simulación en estado estable y, WaterGEMS para la elaboración de la propuesta de diseño del acueducto de Ciudad de los Niños, realizado bajo simulaciones en estado estable y en periodo extendido. Para el modelado del sistema propuesto se elaboraron escenarios con el fin de conocer el comportamiento del acueducto al enfrentar situaciones de funcionamiento normal, en el arranque y ante la atención de emergencias.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 **Objetivo general**

Realizar un diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños existente para elaborar una propuesta de diseño.

### 1.1.2 **Objetivos específicos**

- Diagnosticar del sistema de abastecimiento de agua de consumo actual.
- Simular el comportamiento hidráulico del agua en tuberías que conforman el sistema de abastecimiento existente mediante una herramienta computacional.
- Proponer un diseño para el abastecimiento de agua de consumo en Ciudad de los Niños

## **2 MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 GENERALIDADES DE TOPOGRAFÍA**

La topografía estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones relativas de puntos de interés sobre la superficie terrestre, mediante la combinación de procesos según los tres componentes del espacio geográfico: distancia, dirección y elevación. Un levantamiento topográfico corresponde al conjunto de operaciones llevadas a cabo desde la determinación de posiciones de puntos en campo hasta la generación de planos. Los métodos de medición en tiempo real y los convencionales, son alternativas para la determinación de la posición geográfica de un punto (Cruz, 2008).

#### **2.1.1 Sistemas Globales de Navegación por Satélite**

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, siglas en inglés) proporcionan un sistema de geoespacial autónomo, posicionamiento con cobertura regional o global (Ahmadi, 2014). Los GNSS están constituidos por la constelación de satélites, el segmento de control operacional y el segmento de usuario, que es la recopilación de todos los receptores de usuarios. El segmento de control monitorea la funcionalidad y el estado general del satélite, así como la integridad de la señal, mantiene la configuración orbital del segmento espacial y actualiza los parámetros que permiten un cálculo preciso de las coordenadas de cada satélite en el cielo, lo cual es indispensable para determinar el posicionamiento de los receptores de usuario (Dardari, Luise, & Falletti, 2012). GPS, GLONASS y Galileo son algunos de los GNSS existentes. El GPS y Galileo tienen ventaja sobre GLONASS debido, principalmente, a que los dos primeros cuentan con estaciones de control ubicadas alrededor del mundo, mientras que la estación de control de GLONASS se encuentra por completo dentro del territorio que perteneció a la Unión Soviética, lo que provoca que el GPS y Galileo pueda garantizar un mejor control de la constelación de satélites y de sus señales en comparación con GLONASS (Dardari et al., 2012).

El GPS diferencial (DGPS) es una mejora del GPS, el cual opera usando una red de estaciones terrestres fijas, para transmitir la diferencia entre la posición de un receptor ubicado en cada estación y las posiciones fijas, conocidas y referenciadas geográficamente, de las estaciones

mismas. Esta diferencia presenta un error diferencial que se transmite al receptor móvil, el cual aplica las correcciones correspondientes a sus propios datos de GPS. Las correcciones diferenciales se pueden aplicar en tiempo real o mediante un procesamiento posterior utilizando un software de procesamiento especial y bases de datos DGPS apropiadas (Dardari et al., 2012). Las correcciones diferenciales para mediciones en tiempo real requieren de comunicación constante de datos entre la estación base, el receptor móvil y la nube de satélites, por lo que las mediciones en procesamiento posterior suelen asegurar un mayor grado de precisión que las realizadas en tiempo real (Jiang, Cui, & Li, 2012).

### **2.1.2 Métodos convencionales de levantamiento**

El teodolito y la estación total, son los instrumentos más comúnmente usados en este método de medición. Los métodos convencionales requieren de puntos de amarre anteriormente establecidos con instrumentos de posicionamiento en tiempo real y obtenidos con gran precisión. Mientras que el teodolito mide ángulos verticales y horizontales, la estación total mide las distancias horizontales, verticales y ángulos. Las estaciones totales cuentan con un software incorporado que, una vez configurado, permite calcular su posición desde puntos conocidos, así como calcular el ángulo y la distancia a la que se encuentra de un punto de interés (Doran, 2010).

Generalmente, se utiliza una estación total junto con un prisma retrodirectivo para determinar la ubicación de un punto específico sobre la superficie de la tierra, respecto a uno con posicionamiento geográfico conocida. El prisma, permite reflejar una onda de señal de medición de distancia electrónica (Ritchie, 2007). La medición de distancia opera enviando un haz electrónico desde un telescopio (estación total) a una superficie reflectante (prisma), que luego devuelve el rayo al instrumento para que pueda calcular la distancia al centro del prisma. Generalmente, la precisión para la medición de distancias puede verse afectada por la escasez de buenas prácticas durante la medición, como mantener el bastón del prisma fuera de la plomada o cuando la señal de medición de distancia se encuentra cerca de una obstrucción, arriesgando a que la señal pueda ser interrumpida (Doran, 2010).



## 2.2 SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Los sistemas de distribución constituyen el medio por el que se transporta el agua potabilizada desde un reservorio hasta el sitio de aprovechamiento. El agua debe ser recibida por el consumidor con valores hidráulicos y de salubridad aceptables, de manera que cumplan con los límites establecidos por los reglamentos y normas referentes. Para alcanzar los requisitos en cada punto de consumo, el sistema debe ser provisto de energía mediante equipos de bombeo o mediante un diferencial de altura respecto al tanque de almacenamiento. Los principales componentes de un sistema de abastecimiento de agua son: tanques de almacenamiento, bombas hidráulicas, fuentes de captación, red de distribución y conducción (Savic & Banyard, 2011).

### 2.2.1 Requerimientos de uso de agua

El consumo de agua corresponde a la cantidad de agua utilizada por los usuarios para la realización de actividades específicas, sin incluir pérdidas en el sistema. La demanda, por su parte, es la suma del caudal de agua de consumo y las pérdidas de los elementos que conforman el acueducto (CONAGUA, 2007).

El Manual Técnico del Departamento de Aguas del Instituto Meteorológico de Costa Rica (2004), establece valores mínimos de servicio de agua potable para cada tipo de uso de agua. Los usos de agua pueden clasificarse en domiciliar, agroindustrial, industrial, de servicios y riego, dichas categorías se subdividen en otras más específicas.

### 2.2.2 Fuentes de obtención de agua

Las captaciones de agua superficiales son las más sencillas de obtener. Se toman directamente del cauce del río o quebrada mediante la elaboración de un pequeño embalse. Debido a su exposición a contaminantes, el agua procedente de estas fuentes requiere de un tratamiento posterior para su eliminación. Utilizar el agua superficial para el abastecimiento de una comunidad puede representar un problema durante las distintas épocas climáticas del año, debido a esto, se deben tomar las consideraciones pertinentes para garantizar el suministro continuo a los consumidores. Por otra parte, los sistemas de agua subterránea

representan un almacenamiento natural de agua que, mediante la interacción de las partículas del suelo, puede purificarse y representar un suministro de agua limpia. Es posible acceder al agua subterránea por medio de pozos o captaciones cuando el agua alcanza la superficie del suelo (Savic & Banyard, 2011).

En Costa Rica se establecen áreas de protección en sitios en los que se ubican zonas de recarga, nacientes y ríos. El radio de protección para nacientes es de cien metros horizontales, para ríos, arroyos o quebradas son franjas de diez metros de ancho a partir de los márgenes del cauce para zonas urbanas y quince metros para zonas rurales. El área de protección de zonas de recarga requiere de estudios hidrogeológicos para su determinación (Asamblea Legislativa, 1996).

### **2.2.3 Tanques de almacenamiento de agua**

La estabilización del volumen de suministro es el principal objetivo de la construcción de tanques de almacenamiento. La elevación del agua almacenada propicia el mantenimiento de una presión adecuada en las tuberías de distribución que se encuentran directamente conectadas al tanque. Cuanto mayor sea el volumen del tanque, mayor es la estabilidad de la presión en el sistema de distribución, a pesar de las variaciones bruscas en la demanda o de los cambios de flujo de suministro debido al funcionamiento de las bombas. Así mismo, las fluctuaciones en el requerimiento de agua de la población abastecida son siempre compensadas debido a la existencia del almacenamiento. Su existencia en un acueducto garantiza la confiabilidad del suministro de agua, regulan la presión de las tuberías, reduce el tamaño de la red de distribución y mejora la eficiencia operativa. La ubicación, su operación, el tamaño y tipo de tanque, son aspectos importantes a tomar en cuenta para su diseño (Bryce & Philp, 2005).

#### **2.2.3.1 *Volumen de regulación***

Se encarga de brindar suministro de agua en las horas de máxima demanda y proveer valores de presión adecuados a la red de distribución. El volumen debe ser suficiente para compensar las variaciones de caudal que se presentan entre el caudal de alimentación y el caudal de

consumo en cada instante. Mediante la determinación de caudales de diseño y patrones de consumo es posible obtener el volumen de regulación (Magne, 2008).

Los caudales de diseño, que corresponden al caudal medio diario ( $Q_{med}$ ), el máximo diario ( $Q_{md}$ ) y el máximo horario ( $Q_{mh}$ ), requieren de la determinación previa de otros parámetros para su cálculo. La población del año de diseño, la población futura y la demanda futura son parámetros claves para la obtención de caudales para el diseño de las diferentes estructuras que conforman un sistema de abastecimiento de agua de consumo humano (CONAGUA, 2007).

Los patrones de consumo pueden representarse de manera continua o discontinua, generando curvas de consumo o hidrogramas, respectivamente. Los patrones de consumo relacionan el uso agua con la hora del día. Generalmente se basan en la relación de un factor de multiplicación respecto al tiempo, por lo que el factor de multiplicación de valor 1 es interpretada como base y representa el caudal medio diario. Los patrones pueden establecerse para diferentes periodos de tiempo, desde un día hasta un año y el periodo depende de la cantidad de datos con los que se cuentan para la elaboración de la curva de consumo (Shammas & Wang, 2016)

La variabilidad de la demanda de un acueducto depende de las actividades realizadas en diferentes épocas del año. Se esperaría que para actividades que dependen, por ejemplo, de condiciones climáticas, tengan cambios bruscos en los requerimientos de demanda. Los patrones de demanda de actividades agrícolas suelen presentar gran inestabilidad a lo largo de un año debido a los tiempos de cultivo y dependencia de los factores climáticos. Por otro lado, las demandas industriales o domésticas suelen comportarse de manera constante a lo largo de un año (Shammas & Wang, 2016).

La determinación del volumen de regulación mediante curvas de consumo debe ser determinado de forma gráfica o analítica respecto a patrones de consumo correspondientes a la zona de estudio. El tipo de abastecimiento (bombeo, gravedad o mixto), el periodo de funcionamiento y tiempos de bombeo, son aspectos que se deben tomar en cuenta para la aplicación de cualquiera de los dos métodos (Magne, 2008).

El método analítico consiste en una tabla de consumo realizada a partir de un hidrograma o una curva de demanda, el cual, preferiblemente, debe ser obtenido mediante pruebas realizadas en la zona de estudio. En el cuadro 2.1 se muestra un ejemplo de la aplicación de un método analítico creado a partir del hidrograma de consumo de la figura 2.1. En este caso, el suministro de entrada es constante durante las 24 horas de estudio y la demanda horaria fluctúa según las necesidades de la población, generando valores del máximo excedente (valor positivo) y máximo déficit (valor negativo) (Magne, 2008).

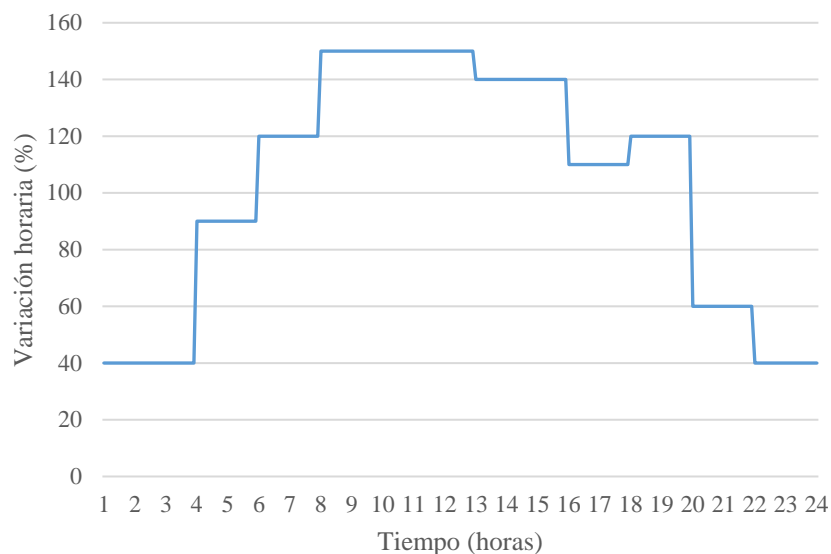


Figura 2.1. Hidrograma de consumo de una población menor a 2000 habitantes. Fuente: (Magne,2008)

Cuadro 2.1 Hidrograma de consumo de una población menor a 2000 habitantes.

Tiempo (horas)	Suministro Caudal (%)	Demanda Caudal (%)	Diferencia	Diferencias acumuladas
0 - 1	100	40	60	60
1 - 2	100	40	60	120
2 - 3	100	40	60	180
3 - 4	100	40	60	240
4 - 5	100	90	10	250
5 - 6	100	90	10	260
6 - 7	100	120	-20	240
7 - 8	100	120	-20	220
8 - 9	100	150	-50	170
9 - 10	100	150	-50	120
10 - 11	100	150	-50	70
11 - 12	100	150	-50	20
12 - 13	100	140	-40	-20
13 - 14	100	140	-40	-60
14 - 15	100	140	-40	-100
15 - 16	100	140	-40	-140
16 - 17	100	110	-10	-150
17 - 18	100	110	-10	-160
18 - 19	100	120	-20	-180
19 - 20	100	120	-20	-200
20 - 21	100	60	40	-160
21 - 22	100	60	40	-120
22 - 23	100	40	60	-60
23 - 24	100	40	60	0
$\Sigma$	2400	2400		

Adaptado de (Magne, 2008)

El método gráfico consiste en trazar las curvas porcentuales de consumo y suministro en un gráfico. La curva masa es una gráfica acumulativa del volumen de descarga de un reservorio y corresponde a la integración de un hidrograma o curva de consumo con respecto al tiempo. La pendiente de la curva de demanda en cualquier punto en el tiempo representa el flujo de descarga para ese tiempo, por lo que la región de la curva con mayor pendiente corresponde a un periodo de mayor descarga. Cuanto mayor sea el periodo de registro de variación del volumen de un reservorio, más confiables serán los resultados (Prasuhn, 1992).

La curva de suministro y la de demanda se trazan en el mismo gráfico para poder determinar el volumen faltante o el excedente respecto a la demanda, ver figura 2.2. Si en una región del gráfico la curva de demanda se encuentra por arriba de la de suministro indica un sobrante o excedente de volumen en el tanque, en caso contrario, representaría un volumen faltante. La

distancia vertical de separación máxima entre las curvas representan el porcentaje de volumen excedente o faltante, según corresponda (Magne, 2008).

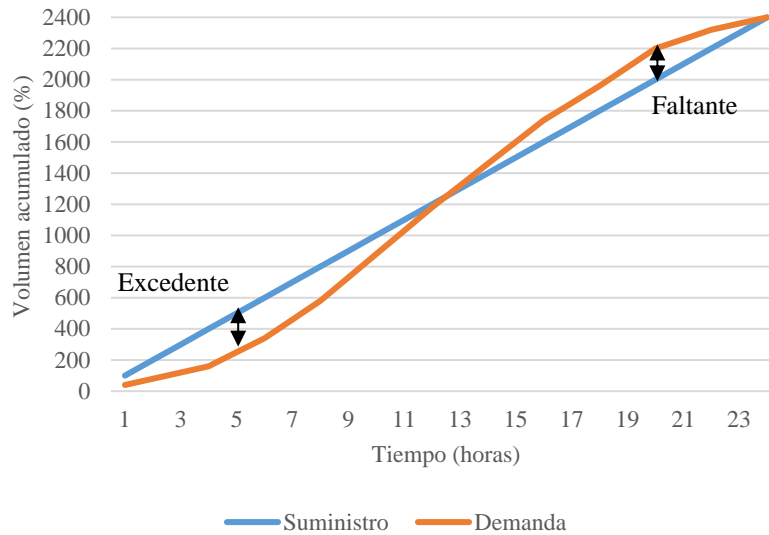


Figura 2.2 Curva masa para un suministro de 24 horas. Adaptación de (Magne, 2008)

### 2.2.3.2 *Volumen de reserva*

Establecido a partir del riesgo de interrupción del suministro debido a fallas en la red de conducción o en obras de captación de agua, así como del tiempo aproximado de reparación (Shammas & Wang, 2016). Según el reglamento sobre normas de diseño del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, el volumen de reserva debe ser el equivalente a un periodo de cuatro horas del caudal máximo diario (AyA, 2001).

### 2.2.3.3 *Volumen para incendios*

Corresponde al volumen de agua almacenada especialmente para combatir incendios (Gorse, Johnston, & Pritchard, 2012). Los depósitos de reserva para incendios con una elevación mayor al hidrante son ideales, ya que no dependen de energía eléctrica para mantener la presión en el hidrante. Un sistema de protección contra incendios debe diseñarse para funcionar correctamente sin la necesidad de implementar un sistema de bombeo que

abastezca el hidrante en emergencias, si es imposible conseguir un abastecimiento por gravedad, se deberá implementar una bomba contra incendios (Pienta, 2015).

En Costa Rica se establece que el diámetro nominal libre de la tubería de conexión entre el hidrante y la red de tubería no debe ser menos a 152,4 mm. En caso de que no se tenga la posibilidad de conectar la tubería del hidrante a la red de distribución, es necesario construir un tanque de almacenamiento de capacidad mínima de 57 m<sup>3</sup> e instalar una toma directa para bomberos. El suministro de agua debe ser suficiente para abastecer el caudal nominal de la bomba contra incendios por al menos 30 minutos. La tubería de conexión entre el tanque de abastecimiento y el hidrante, debe ser de hierro negro cédula 40 de 152.4 mm de diámetro (Bomberos de Costa Rica, 2013). Si el sistema de distribución no es capaz de proveer un caudal mayor a 8,33 l/s, no es necesaria la implementación de un hidrante (NFPA, 2017).

#### **2.2.4 Obras de conducción y aducción de agua**

Las obras de aducción corresponden a aquellas tuberías utilizadas para el transporte de aguas crudas o que sólo requieran desinfección hasta el tanque de almacenamiento o al inicio de la red de distribución, en caso de no se cuente con estructuras de almacenamiento, mientras que las obras de conducción son aquellas que transportan agua tratada (AyA, 2016).

El traslado de agua por tuberías puede llevarse a cabo mediante bombeo o gravedad. El transporte de agua por gravedad aprovecha la energía disponible por efecto de la fuerza de gravedad. Se pueden presentar cargas negativas que indican que la energía gravitacional no es suficiente para transportar la cantidad de agua esperada, lo cual se presenta debido a que el recorrido de la fuente al punto de destino es ascendente (Magne, 2008).

Cuando se requiere trasladar el agua mediante tuberías desde un punto bajo del terreno a uno de mayor elevación, se requiere la implementación de equipos de bombeo. En este caso, el agua dentro de la tubería posee una presión mayor a la atmosférica y se desplaza a sección llena (Magne, 2008). Estos sistemas de transporte de agua consisten en una bomba, una tubería de succión y una de impulsión. La bomba debe ser capaz de vencer la carga estática y la dinámica. La carga estática está definida por las pérdidas de carga ocasionadas por la fricción del agua en las tuberías y accesorios. La dinámica que corresponde a la diferencia

de carga entre el nivel de succión y el de descarga de la bomba (Tukker, Kooij, & Pothof, 2016).

La elección de la bomba centrífuga se realiza a partir de su curva característica, la cual relaciona la carga o presión de trabajo de la bomba en función de un flujo de operación. Los parámetros de bombeo se determinan a partir de la presión requerida por el sistema, así como sus características. Usualmente la curva característica de la bomba y la de eficiencia se grafican juntas para obtener el grado de eficiencia de la bomba respecto al caudal de trabajo elegido (Shammas & Wang, 2016). En la figura 2.3 se muestra el trazado de la curva de la bomba y la curva de requerimiento del sistema.

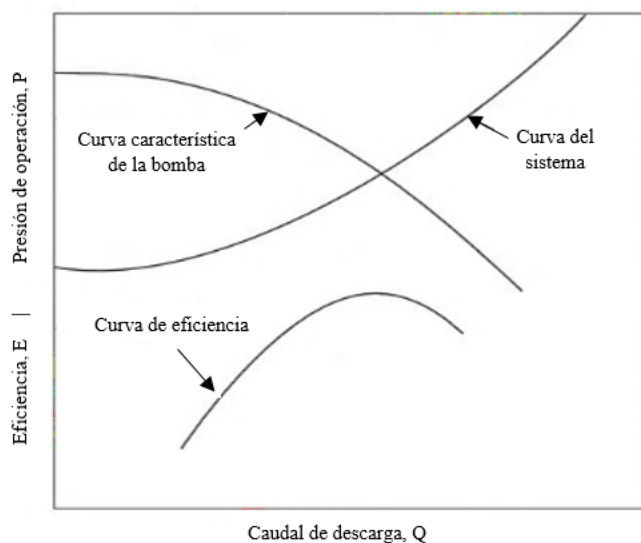


Figura 2.3 Características de rendimiento de una bomba centrífuga funcionando a velocidad constante. Adaptación de (Shammas & Wang, 2016)

### 2.2.5 Red de distribución de agua

El trazado de redes de distribución de agua se realiza en función de las condiciones del terreno y de la ubicación de los puntos de consumo. Únicamente la red primaria de distribución se clasifica mediante configuraciones, las cuales son de tipo cerrada, abierta o combinada. Las redes de distribución cerradas o malladas forman circuitos, los cuales son una serie de tubos conectados en forma de polígono donde el agua, que inicia su trayecto en un punto, vuelve al mismo después de recorrer toda la tubería que lo compone. La red abierta está conformada



por un conjunto de tubos que se ramifica sin formar circuitos. Esta configuración de red es utilizada cuando el terreno presenta gran irregularidad en su topografía o cuando la comunidad es muy dispersa. La red combinada es aquella que cuenta con ambas configuraciones, abiertas y cerradas (CONAGUA, s.f.).

La continuidad de abastecimiento no se ve afectada en redes de distribución cerradas, en caso de que se presenten fallas que requieran reparaciones, permitiendo el suministro en la totalidad o la mayoría del acueducto, mientras que en redes ramificadas es necesario interrumpir el servicio de agua por completo durante las reparaciones. En redes de distribución abiertas pueden desarrollarse crecimientos bacterianos, acumulaciones de hongos o sedimentación en extremos de tuberías y puntos muertos. La configuración mallada de una red de distribución propicia el movimiento permanente del agua en su interior por lo que la probabilidad de acumulaciones es muy pequeña (CONAGUA, s.f.).

El sistema de distribución debe ser capaz de suministrar la cantidad de agua requerida en un momento específico del día. Para trasladar el caudal requerido hasta el punto de interés, el sistema de distribución debe contar con valores de presión adecuados en diferentes puntos de la red. La presión del sistema debe ser superior a las pérdidas de carga generadas por el flujo de agua dentro de la tubería y capaz de vencer la carga diferencial para poder abastecer el punto de mayor altitud de un edificio (Merritt & Ricketts, 2001). En zonas de baja presión de la red de distribución la velocidad del flujo aumenta, lo que puede generar cavitación. La cavitación responde a la generación de burbujas de vapor de agua en sitios de baja presión, las burbujas implosionan si se trasladan a zonas de mayor presión generando erosión en las paredes internas o roturas en las tuberías (Shaughnessy, Katz, & Schaffer, 2005).

En Costa Rica se establecen valores mínimos y máximos para parámetros de relevancia en redes de distribución de agua. El diámetro de tuberías no debe ser menor a 101,6 mm para tuberías principales de la distribución y para conexiones domiciliarias se utiliza un diámetro de 13 mm como mínimo. La presión en tuberías no puede ser menor a 15 mca ni mayor a 50 mca; para acueductos ubicados en terrenos muy irregulares se permite una presión máxima de 70 mca. Así mismo se establecen un valor máximo de velocidad de 3 m/s (AyA, 2016)

El envejecimiento de las tuberías, los movimientos de tierra y los sismos pueden provocar que se rompan o se generen espacios entre las uniones generándose fugas. Debido a variaciones de presión en las tuberías o a cortes de servicio, es posible que los orificios que pueda tener el conducto, permitan la entrada y salida de líquidos. Es por eso que las tuberías de conducción, aducción o distribución no deben ubicarse bajo el nivel de agua del subsuelo, ya que de existir una fuga en la tubería es posible que, si el agua subterránea contiene algún tipo de contaminante, ingrese a la tubería y represente un peligro para los consumidores del acueducto (Shammas & Wang, 2016).

## 2.3 MODELAMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

El modelado implica el uso de una herramienta de computadora para predecir el rendimiento del sistema de distribución y resolver problemas de diseño, funcionamiento y calidad del agua del acueducto. Las herramientas para modelamiento de redes son muy variadas y pueden determinar valores de presión, caudal y demás parámetros de interés. Cada herramienta para modelación tiene sus diferentes capacidades, aquellas más sofisticadas permiten hacer estudios operacionales en el acueducto como la evaluación de la capacidad de almacenamiento, generación de sistemas de control y la búsqueda de alternativas para suministrar agua bajo escenarios complejos (AWWA Staff, 2012).

### 2.3.1 Modelación con CivilCAD

CivilCAD® es una herramienta de diseño creada por ARQCOM para establecer funciones adicionales que automatizan y simplifican las tareas dentro de AutoCAD® Full, Bricscad® y PRO ZWCAD+. CivilCAD cuenta con módulos adicionales que permiten el cálculo de diseños en redes de transporte de agua, en carreteras y movimientos de tierra. El módulo para el cálculo de redes de agua potable tiene la capacidad de calcular redes de distribución en configuraciones abiertas, cerradas y combinadas, distribuye caudales de forma proporcional a la longitud de tramos o a la población alimentada, genera reportes de cálculo hidráulico, traza conexiones entre las tuberías y genera un reporte de la cuantificación de piezas especiales en cruceros (Martínez, 2015).

La herramienta cuenta con tres métodos para la distribución de caudales en tuberías. El primero de ellos se calcula a partir del gasto indicado, el método respeta el valor de caudal establecido para cada una de las tuberías que componen la red de distribución, racionando el valor faltante en nodos para que la suma de caudales sea igual a cero. Respecto a la distribución a partir de unidades alimentadas, la herramienta calcula la diferencia entre el caudal de alimentación y la suma de gasto en nodos para distribuir el caudal de forma proporcional a la población que requiere consumo en cada tramo. En la figura 2.4 se especifica el método de cálculo para distribución de caudal a partir de unidades de alimentación. La distribución de caudal a partir de la longitud de tuberías tiene el mismo método de cálculo que el anterior, la diferencia radica en que en lugar de utilizar los valores asignados de unidades de alimentación, toma el caudal de abastecimiento y lo distribuye a partir de las longitudes de cada tramo respecto a la longitud total de las tuberías que conforman la red de distribución (Martínez, 2015).

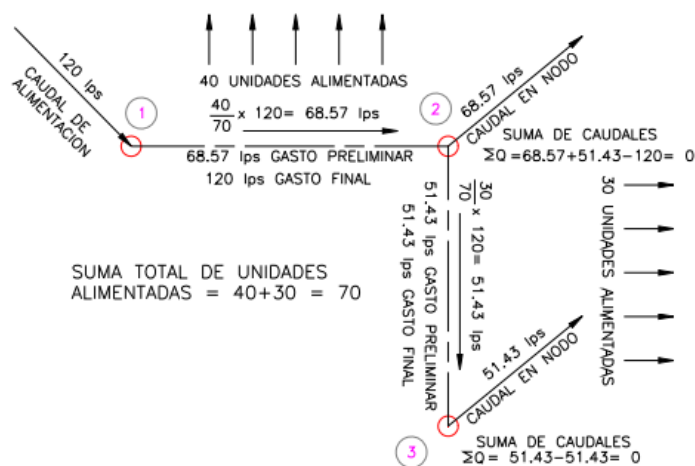


Figura 2.4 Distribución de caudal de las unidades de alimentación indicadas

Fuente: (Martínez, 2015)

La herramienta permite elegir el método de cálculo para las pérdidas de carga en tuberías; el cálculo se realiza a partir de las fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Manning (Martínez, 2015). La fórmula de Hazen-Williams realiza el cálculo de pérdidas respecto al diámetro, la longitud, el flujo y un coeficiente de rugosidad según el material de la tubería. Es el método más comúnmente utilizado a pesar de ser únicamente aplicable a condiciones de tubería de flujo turbulento. El cálculo a partir de la fórmula de Darcy-Weisbach considera

parámetros adicionales que pretenden realizar un mejor acercamiento a la realidad, como lo es la velocidad de flujo, un coeficiente de fricción y el coeficiente de pérdidas mínimas. El coeficiente de pérdida mínimas es variable y se debe calcular para las condiciones de cada tramo de tubería, lo cual genera una mayor confiabilidad en los resultados. La fórmula de Darcy-Weisbach es aplicable para todos los fluidos, en flujo turbulento o laminar. La ecuación de Manning es aplicable para resolver problemas de flujo de tuberías parcialmente llenas y considera únicamente parámetros de elevación de tubería (AWWA, 2014).

#### 2.3.1.1 *Calibración del modelo*

La probabilidad de que una simulación represente el funcionamiento de redes de distribución al cien por ciento es muy baja debido a consideraciones iniciales, simplificaciones de red y limitaciones propias del modelo matemático utilizado, por lo cual es necesario recurrir a su calibración. La calibración del modelo corresponde al proceso en el que se realizan ajustes en los parámetros de la simulación para conseguir que éste represente las condiciones reales del sistema de abastecimiento en un grado adecuado de precisión. Los parámetros más comúnmente utilizados para la calibración son el caudal que circula por los tramos de tubería y la presión de cada uno de los nodos sometidos a estudio. La variación de presión entre valores reales y obtenidos en el modelo no deberá ser mayor al 5% para el 85% de las mediciones, 7.5% para el 75% de las mediciones y 15% para la totalidad de las mediciones, mientras que la diferencia entre valores de caudal en tuberías principales no deberá superar el 5% (CONAGUA, s.f.).

#### 2.3.2 **Modelamiento con WaterGEMS**

WaterGEMS es una herramienta de diseño y modelación de sistemas de distribución de agua de Bentley Systems. A partir de la herramienta WaterGEMS, Bentley creó WaterCAD, que es también una herramienta de diseño, por lo que constituye un subconjunto de WaterGEMS que cuenta con menor cantidad de módulos de cálculo. La herramienta permite visualizar el comportamiento de las estructuras ante las estrategias operativas implementadas. Cuenta con una gran variedad de herramientas para realizar un diseño que asegure el suministro de agua constante a cada uno de sus clientes, desde el momento de apertura hasta el final de su periodo de diseño. Contiene asistentes de cálculo que facilitan la asignación de datos a los

componentes del modelo, TRex Wizard, ModelBuilder y LoadBuilder son los módulos básicos con mayor uso para la creación de modelos o diseños (Bentley, 2017).

El asistente TRex permite la asignación automática de elevaciones a nodos especificados a partir de curvas de nivel del área de interés. ModelBuilder asiste en la importación de archivos que contienen esquemas de tuberías, permitiendo crear, editar y administrar conexiones que serán utilizadas en el proceso de creación de modelos; las conexiones están constituidas por un conjunto de procesos que permiten la movilización de información entre el archivo fuente y el objetivo. El asistente LoadBuilder permite la carga de datos de demanda basado en operaciones de análisis espacial (Bentley Systems, 2008).

La vinculación de registros de consumo al modelo se puede realizar por métodos de asignación, distribución y proyección. El método más comúnmente usado es el de asignación, el cual permite enlazar los datos de caudal al nodo más cercano o a la tubería más cercana. Los métodos de distribución realizan reparticiones de caudal equitativos, respecto a datos poblacionales o áreas de los edificios. Los de proyección se realizan respecto a relaciones poblacionales y uso de la tierra (Bentley Systems, 2008).

Los sistemas de abastecimiento pueden contener decenas de elementos entre uniones de tubería, equipos de impulsión, tanques de almacenamiento, reservorios y un sinnúmero de accesorios. Sin embargo, en el modelo computacional de un sistema de abastecimiento completo sólo se incorporan elementos fundamentales del sistema; en el cuadro 2.2 se pueden observar los elementos normalmente incluidos en un modelo. Los elementos de un modelo pueden diferir respecto a sus significados en la realidad, los reservorios son representados como un nodo y tienen la capacidad de recibir y suministrar, de manera constante, grandes cantidades de agua, por lo que el nivel del reservorio se mantiene durante el periodo de simulación. A diferencia de los reservorios, la línea de nivel del tanque de almacenamiento fluctúa en función del caudal de suministro y el de demanda. Los tanques de almacenamiento tienen un volumen de almacenamiento finito, por lo que el tanque puede alcanzar su máxima capacidad o evacuar todo su almacenamiento. Los valores operacionales asignados corresponden a los niveles del tanque, donde el nivel base es la elevación desde la cual se miden los demás niveles, la elevación mínima corresponde al nivel más bajo de agua que se

debe tener dentro del tanque y la elevación máxima representa el nivel de llenado completo (Bentley Systems et al., 2007).

Cuadro 2.2 Elementos comunes en modelamiento de redes de distribución de agua

<b>Elemento</b>	<b>Tipo</b>	<b>Propósito de modelamiento primario</b>
Reservorio	Nodo	Suministro de agua al sistema
Tanque	Nodo	Almacenamiento del exceso de agua y liberación del agua en momentos de mayor demanda
Unión	Nodo	Remueve o adhiere agua del o para el sistema
Tubería	Enlace	Transporta el agua de un lugar a otro
Bombas	Nodo o enlace	Eleva el grado hidráulico para superar las diferencias de elevación y pérdidas por fricción
Válvulas	Nodo	Remueve agua del sistema
Hidrantes	Nodo	Control de presión o de flujo de agua

Adaptación de (Bentley Systems et al., 2007)

WaterGEMS permite agregar controles de operación a muchos de los elementos que conforman la modelación, los cuales permiten modificar la configuración de un elemento en función del tiempo, caudal de paso, velocidad y presión del agua, entre otros, de manera que puedan ser aplicables a la futura construcción del sistema de abastecimiento sometido a modelación inicialmente. En un modelo los controles pueden ser aplicados a todos los elementos que puedan controlar el paso de agua, como tuberías, bombas, uniones, hidrantes y válvulas. En un sistema de distribución real, la implementación de controles evita el monitoreo constante y la operación manual del acueducto, lo que reduce errores y costos en la operación (Bentley Systems et al., 2007).

Las bombas generalmente se configuran respecto al nivel del tanque de almacenamiento o a valores de presión en tuberías. La bomba se enciende cuando los tanques de agua drenan a un nivel mínimo de agua y se apagan cuando alcanza el punto máximo especificado, justo debajo del nivel de desbordamiento, mientras que los controles en función de la presión funcionan con valores mínimos para encendido y máximo para apagado. Las uniones en la modelación corresponden a un punto geográfico del cual se requiere realizar una extracción o inyección de agua. El valor de elevación de las uniones debe determinarse de acuerdo a la elevación del terreno y a la profundidad en que debe ser enterrada la tubería, con el fin de obtener valores de modelamiento más cercanos a la realidad. Las tuberías reales tienen una longitud aproximada de seis metros, lo que implica que entre cada tubería debe existir una

unión. En el modelamiento, los accesorios y uniones de tuberías pueden representarse como un solo elemento de tubería (Bentley Systems et al., 2007).

Con WaterGEMS es posible realizar simulaciones de estado estacionario (SEE) y de periodo extendido (SPE). La simulación de SEE corresponde a una fase del sistema que no cambia en el tiempo, el nivel de tanques de almacenamiento no varía y el funcionamiento de las bombas y las demandas hidráulicas se mantienen constantes. La carencia de acciones en función del tiempo produce que la SEE sea una representación irreal del sistema, debido a la constante variación de parámetros en un sistema de abastecimiento. La SPE representa un análisis dinámico tridimensional del sistema durante un periodo de tiempo. Con una SPE es posible visualizar el comportamiento de las estructuras a través del tiempo, como los ciclos de llenado y drenaje de los tanques de almacenamiento y el comportamiento de las bombas respecto a los cambios del sistema (AWWA, 2012).

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ACTUAL

En la figura 3.1 se muestra de manera esquemática el proceso metodológico que requiere el diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños.

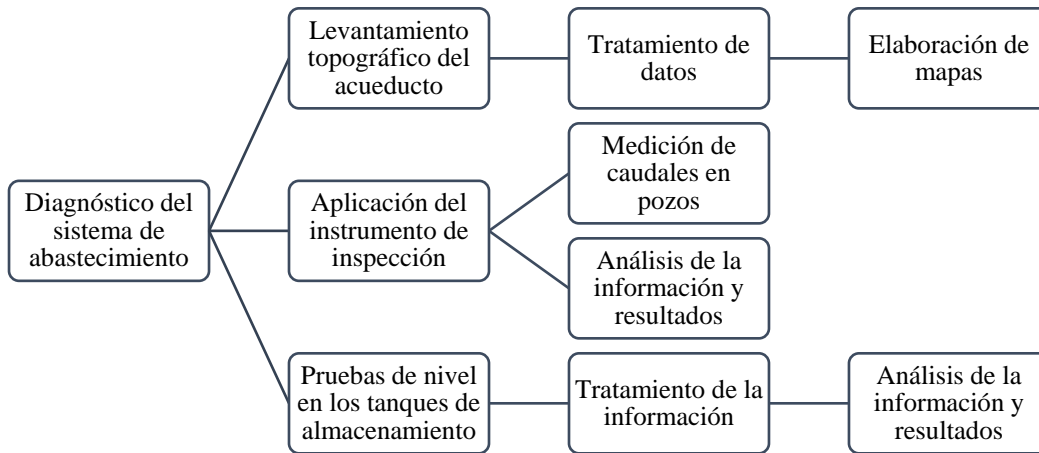


Figura 3.1 Esquema metodológico para la elaboración del diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua actual.

##### 3.1.1 Aplicaciones de topografía

###### 3.1.1.1 Levantamiento de puntos de amarre

Se utilizó el Receptor Leica Viva GS14 GNSS, la Antena GS14 GNSS y el Control de Campo CS. Todo el equipo, junto con un trípode y un bípode, fue facilitado por el Programa de Abastecimiento de Agua de la Escuela de Ingeniería en Construcción del TEC. La medición fue realizada en conjunto con el Ingeniero Ambiental Atahualpa Pérez Coto.

El receptor base se colocó sobre el mojón PC1, ubicado dentro de las instalaciones de TEC, mientras que el control y la antena fueron llevados a las instalaciones de CDN para el levantamiento, las coordenadas del mojón se presentan en el cuadro 3.1. Una vez en Ciudad de los Niños, se eligieron dos sitios que facilitarían el arranque del posterior levantamiento del sistema de abastecimiento de agua existente. Con la ayuda de un bípode, se mantuvo inmóvil el receptor móvil durante cada medición, cada una se demoró entre 15 y 30 minutos,



ver figura A.1.1, apéndice 1. El levantamiento se realizó mediante el método de procesamiento posterior, requiriendo el uso de un software especial para obtener los puntos una vez finalizada la actividad.

Cuadro 3.1 Coordenadas geográficas del mojón PC1

<b>Mojón</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Latitud (m)</b>	<b>Elevación (m)</b>
PC1	510039,14	1089662,88	1403,85

### 3.1.1.2 *Levantamiento topográfico*

Se utilizó la estación total GeoMax ZIPP10 Pro para realizar el levantamiento de la red de abastecimiento de agua de consumo en CDN, junto con instrumentos complementarios como el trípode, bastón y prisma. La totalidad del equipo fue facilitado por la Carrera de Ingeniería Ambiental del TEC.

El levantamiento de red se realizó gracias a la capacitación previa brindada por el Ingeniero Iván Calderón del PAA de la Escuela de Ingeniería en Construcción del TEC y al apoyo de Ernesto Aguilar, un funcionario de mantenimiento de Ciudad de los Niños que colaboró con la toma de datos, A.1.1, apéndice 1.

Se usó la herramienta de diseño AutoCAD para ubicar los puntos geográficos del acueducto en un plano, trazar las líneas de tubería y la posición de los elementos del sistema de abastecimiento. Posteriormente se utilizó QGIS para agregar información importante a los elementos del acueducto y generar el mapa del sistema de abastecimiento de agua potable de CDN.

### 3.1.1.3 *Generación de mapas*

Se elaboraron algunos mapas para visualizar las distribuciones geográficas de componentes específicos de la institución, así como representar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de agua ante eventos naturales o antropológicos. Se utilizó la herramienta QGIS para la realización de los mapas requeridos. El sistema de proyección utilizado fue CRTM05, con un el datum WGS84. Las coordenadas están dadas en metros.

### **3.1.2 Aplicación de un instrumento de inspección**

Se aplicó el formulario de inspección sanitaria del AyA a cada una de las estructuras del acueducto de Ciudad de los Niños. Al mismo tiempo, se tomaron las coordenadas geográficas de cada estructura inspeccionada con un Navegador Garmin 64sc, facilitado por la Carrera de Ingeniería Ambiental del TEC. Se contó con la supervisión de la Ingeniera Laskmi Barrantes del PAA y con Ernesto Aguilar, funcionario en mantenimiento de CDN, quien fue el guía en la visita.

Se tomaron valores de caudal mediante el método volumétrico en dos de las fuentes de agua de CDN, en el pozo finca y en el pozo principal. Se utilizó un cronómetro para determinar el tiempo de llenado de un recipiente de 15,49 l, la medición se realizó por triplicado. Los instrumentos utilizados para la medición de caudal fueron facilitados por la Carrera de Ingeniería Ambiental del TEC.

### **3.1.3 Pruebas del nivel en los tanques de almacenamiento**

Se realizaron dos pruebas de nivel simultáneas en los tanques de almacenamiento de CDN. Se utilizó un Sensor HOBO 30-Foot Depth Water Level Data Logger, el cual fue facilitado por el PAA de la Escuela de Ingeniería en Construcción del TEC. La prueba fue realizada en conjunto con el Ingeniero Ambiental Atahualpa Pérez.

Cada medición requirió el uso de dos sensores de presión, uno de ellos se colocó dentro del tanque de almacenamiento y otro fuera. La prueba se realizó durante 48 horas, iniciando a las 8:00 a.m. del martes 7 de marzo de 2016 y finalizando a las 8:00 a.m. del jueves 9 de marzo del 2016, permitiendo así, obtener datos para un día completo de funcionamiento del sistema de abastecimiento. Los sensores se configuraron para que realizaran registros de presión y nivel en periodos de cada 5 minutos. Cada uno de los sensores fue fijado a una soga de metal para impedir la pérdida del sensor por la tubería.

Se eligió el día miércoles para realizar la prueba de nivel debido a que, según mediciones realizadas por (Araya, 2012), el miércoles, viernes y sábado son los días de la semana de mayor consumo en un acueducto. Los otros dos días de mayor consumo fueron descartados debido a que las actividades agroindustriales y de servicios se realizan únicamente entre

semana y la salida de estudiantes de CDN debido periodos cortos de vacaciones, se realiza siempre un viernes.

### 3.1.3.1 *Elaboración de la curva de variación horaria de demanda*

Para la determinación de la curva de demanda se requirió el uso de los datos de variación de nivel del tanque de almacenamiento principal. Mediante los controles de operación de la bomba del pozo principal se averiguó el período en que éste abastece al tanque principal, suponiendo un flujo constante obtenido previamente por pruebas volumétricas. Con la información brindada por la Municipalidad de Cartago, se determinó el período en que se cuenta con suministro de agua municipal. La sumatoria de los caudales en las diferentes horas del día, permite obtener el valor de caudal de suministro total. La diferencia entre las variaciones de volumen en el tanque y el volumen de suministro durante un rango de tiempo, permitió la determinación del caudal de demanda del sistema de abastecimiento.

La curva obtenida corresponde a la de demanda total del sistema de abastecimiento existente de Ciudad de Niños y no a la de consumo, por lo que las curvas y cálculos posteriores incluyen el porcentaje total de pérdidas. Lo anterior se debió a las limitaciones para la medición de parámetros de manera directa al acueducto.

## 3.2 MODELACIÓN DE TUBERÍAS EXISTENTES CON CIVILCAD

En la figura 3.2 se muestra de manera esquemática el proceso metodológico que requiere la modelación de las líneas de tuberías actuales que forman parte del sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños.

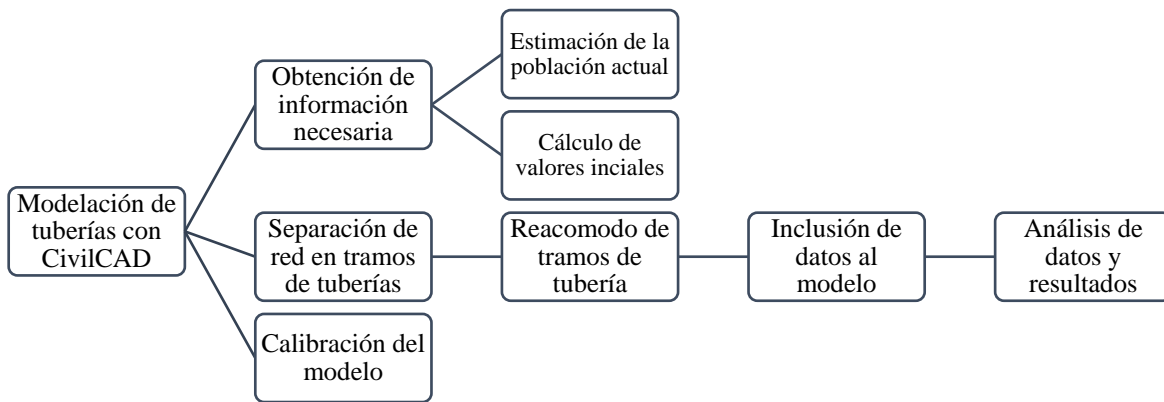


Figura 3.2 Esquema metodológico para la modelación de tuberías actuales de CDN

### 3.2.1 Modelación de tuberías existentes con CivilCAD

A partir del levantamiento topográfico del sistema de abastecimiento realizado, se separan las redes de tuberías en tramos para facilitar la modelación con CivilCAD; los tramos se eligieron en función de la posibilidad de obtención de los valores iniciales necesarios. Posteriormente se realiza un reacomodo de las mismas sin alterar sus características (diámetro, longitud, elevación), de modo que el programa pueda identificar las desviaciones de tuberías y generar cálculos adecuados conforme a la configuración del sistema de abastecimiento de agua existente, ver figura 3.3.

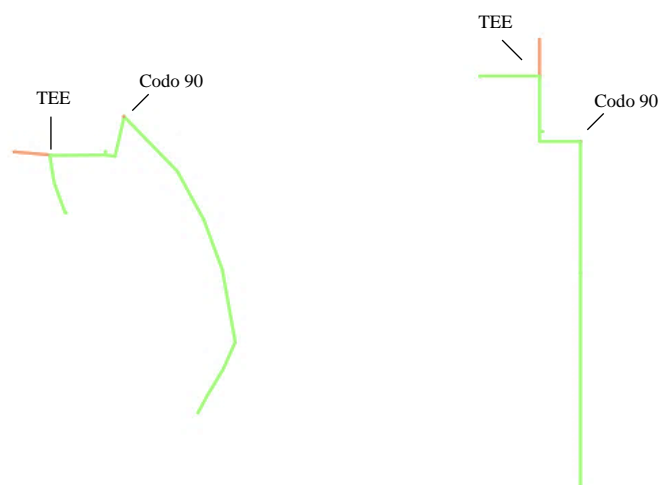


Figura 3.3 Ejemplo de ordenamiento de líneas de tubería templo para facilitar la interpretación por parte de CivilCAD

### 3.2.2 **Obtención de información necesaria**

Para la obtención de los parámetros iniciales de las tuberías de aducción por bombeo, se utilizó la curva característica de cada bomba para ser relacionada con los valores de caudal, obtenidos mediante pruebas volumétricas o por variación de volumen del tanque secundario. Para las tuberías aducción por gravedad se probaron valores de caudal de alimentación con base al máximo flujo que puede transportar la tubería para la presión máxima ofrecida por el acueducto municipal según los datos brindados por (Urbina, 2017).

Los valores de presión para tramos de distribución corresponden a la presión registrada para el mínimo nivel de agua alcanzado en el tanque de almacenamiento correspondiente, obtenidos mediante las pruebas de nivel realizadas en los tanques de almacenamiento con el sensor HOB0. Para la obtención de valor de velocidad se utilizó la Ley de Torricelli, que es una aplicación de la Ley de Bernoulli; el caudal se obtuvo al multiplicar la velocidad con el área de la tubería respectiva.

#### 3.2.2.1 ***Inclusión de datos al modelo***

Se utilizó el módulo para el cálculo de redes de distribución de CivilCAD, el cual requiere la asignación de valores de caudal y presión inicial, elevación y unidades alimentadas en nodos, material de tubería y diámetro de tubería. Se utilizaron valores mínimos y máximos de parámetros de velocidad y presión establecidos por la Norma Técnica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Sistema Pluvial (2016). Tras la inclusión de parámetros se pueden obtener resultados gráficos permitiendo su observación directa en el modelo, como se muestra en la figura 3.4.

De los tres métodos disponibles para la distribución de caudales en los tramos de tubería se utilizó el de asignación de unidades de alimentación, las cuales se calcularon a partir de la demanda de agua total del edificio dividido entre la unidad de alimentación correspondiente para área metropolitana de Ciudad de los Niños. No se contaba con datos de caudal en cada uno de los nodos de la tubería, por lo que se descartó este método de cálculo.

El cálculo hidráulico se realizó mediante el método de cálculo propuesto por Darcy-Weisbach, debido a que éste incluye parámetros adicionales, respecto a otros métodos, que permiten obtener resultados con una mayor similitud a condiciones reales.

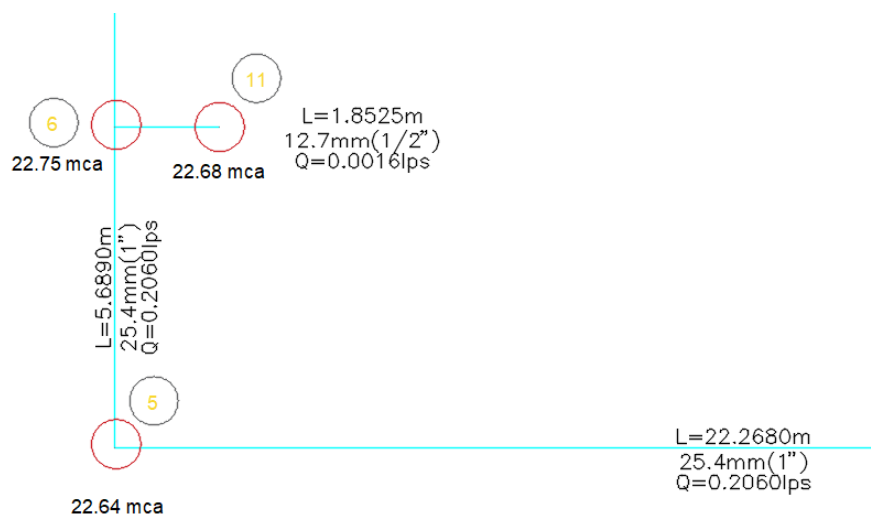


Figura 3.4 Ejemplo de un segmento de la modelación en CivilCAD realizada para la tubería templo

### 3.2.3 Calibración del modelo

Debido a las limitaciones presentadas para la realización de mediciones de parámetros en el sistema de abastecimiento existente en Ciudad de los Niños, necesarias para llevar a cabo la calibración del modelo, no fue posible comprobar el grado de variación entre valores reales del sistema de distribución y los obtenidos en la simulación realizada.

## 3.3 PROPUESTA DE DISEÑO UTILIZANDO WATERGEMS

En la figura 3.5 se muestra de manera esquemática el proceso metodológico que requirió la propuesta de diseño de un sistema de abastecimiento de agua de consumo para la Ciudad de los Niños, elaborada con la herramienta de computacional WaterGEMS, mediante STUDENTserver.

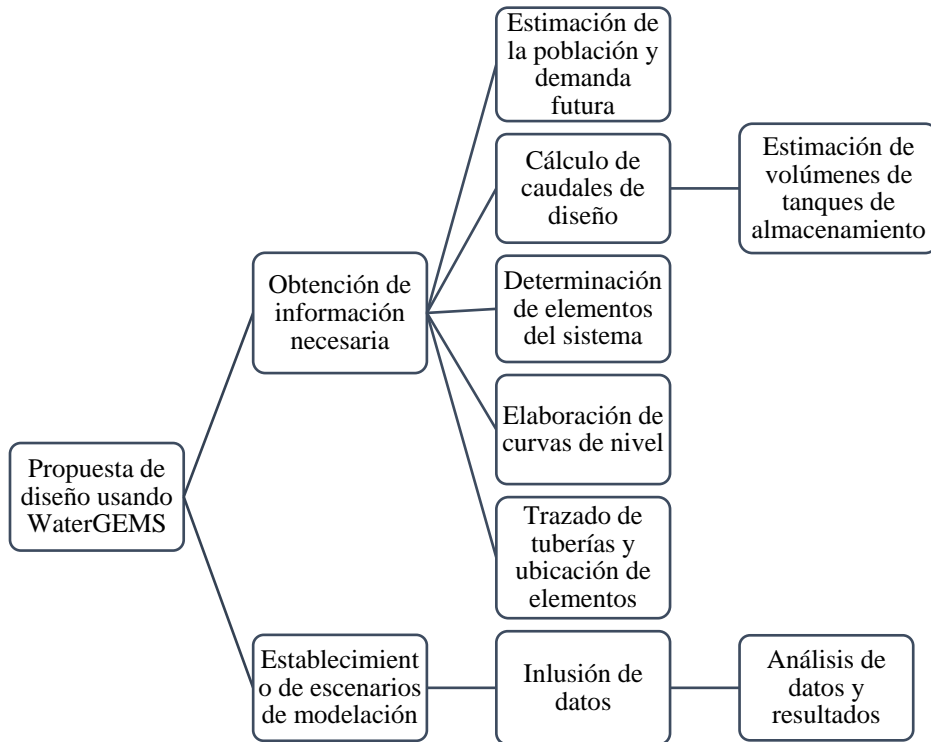


Figura 3.5 Esquema metodológico para la propuesta de diseño realizada mediante WaterGEMS

### 3.3.1 Obtención de información

#### 3.3.1.1 *Determinación de la población*

Los datos de población de animales y de personas, así como la capacidad de edificios fueron facilitados por la institución. A partir de la información brindada y del Manual Técnico del Departamento de Aguas (IMN, 2004) se obtuvieron valores de demanda para cada uno de los edificios o áreas de CDN con requerimientos de consumo de agua.

Conforme a los planes de expansión de infraestructura de Ciudad de Niños se estimó la población futura, para un periodo de diseño de 20 años. Se utilizaron unidades equivalentes para representar la población de animales por medio de una estimación de consumo en cada edificio y, dividiendo este valor por la unidad de consumo de una persona dentro del área metropolitana, que corresponde a 375 l/d.

### 3.3.1.2 *Estimación de caudales de diseño*

Los parámetros de dotación futura y los caudales de diseño se determinaron de forma teórica a partir de la proyección de población futura realizada. La estimación del caudal máximo diario y el máximo horario se realizó de acuerdo a los coeficientes especificados en la Norma Técnica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Sistema Pluvial (2016).

#### 3.3.1.2.1 Determinación de volúmenes de los tanques de almacenamiento

La Norma Técnica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Sistema Pluvial (2016) indica que los volúmenes de reserva y regulación deberán calcularse a partir de curvas de consumo reales y en caso de contar con ellas, por lo que se utilizaron ecuaciones establecidas en (Magne, 2008) para su interpretación. La elaboración de la curva masa requiere el trazado simultáneo de los valores porcentuales de consumo y de suministro. A partir de ella, se obtienen los valores de volumen máximo excedente y máximo faltante en el tanque de almacenamiento, los cuales, junto con el valor de caudal máximo diario, permite la estimación del volumen de regulación que requiere el acueducto.

El volumen de reserva para interrupciones de servicio, se estimó respecto al caudal máximo diario, suponiendo que la interrupción tarde cuatro horas como máximo. Los volúmenes de regulación y reserva se calcularon utilizando las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente.

$$V_R = Q_{md} * 0,036 * (|\%ME| + |\%MF|) \quad (3.1)$$

El  $V_R$  corresponde al volumen de regulación y se expresa en  $m^3$ , el  $Q_{md}$  corresponde al caudal máximo diario con unidades de (l/s) y el %ME y %MF son los porcentajes del volumen máximo excedente y máximo faltante, obtenidos a partir del análisis de la curva de masa.

$$V_{Re} = 3,6 * Q_{md} * t \quad (3.2)$$



El  $V_{Re}$  corresponde al volumen de reserva en caso de interrupciones por reparaciones y se expresa en  $m^3$ , el  $Q_{md}$  corresponde al caudal máximo diario con unidades de (l/s) y el  $t$  es igual al tiempo estimado de reparación de tuberías dado en horas.

El volumen de almacenamiento del tanque para incendios utilizado se obtuvo de acuerdo a lo establecido en el Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios (2013).

### 3.3.1.3 *Elaboración de curvas de nivel*

Se utilizó el módulo de Interfase con Google Earth y la aplicación de Google Earth para la elaboración de las curvas de nivel. Inicialmente se estableció el polígono de interés que delimita las curvas de nivel, se exportó el polígono a Google Earth, posteriormente se generó una malla tridimensional de triangulación y se importó el polígono de Google Earth que contiene información necesaria para la generación de las curvas de nivel. Las curvas de nivel son utilizadas posteriormente para la realización de la propuesta de diseño en WaterGEMS.

### 3.3.2 **Trazado de tuberías**

Se propuso una distribución de tuberías basado en las condiciones de distribución de edificios, de la topografía del terreno y, respecto a normativa nacional e internacional. La escogencia de diámetros se realizó a partir de lo establecido en el Norma Técnica del AyA (2016) estableciendo para las tuberías primarias un diámetro de 101,6 mm, que es el mínimo establecido para redes de distribución, a los ramales que contaban con un nodo al final del tramo se le asignó un diámetro de tubería de 76,2 mm y se le otorgó un nivel de -0.80 m a los nodos respecto a la superficie del terreno, para indicar que las tuberías deberán estar enterradas a una profundidad de 0,80 m. El trazado de tuberías se realizó, además, para procurar la menor cantidad de cruces en las calles, para evitar gastos por reparación de caminos.

### 3.3.3 Establecimiento de escenarios

Se elaboraron tres escenarios de modelación mediante el método de periodo extendido, con el fin de conocer el comportamiento del diseño propuesto en situaciones de funcionamiento normal, de arranque del sistema y de respuesta ante situaciones de emergencia.

#### 3.3.3.1 *Inclusión de archivos a WaterGEMS*

Se realizó una propuesta de reconfiguración del acueducto de Ciudad de los Niños con la herramienta AutoCAD tomando en cuenta la ubicación de edificios, características del terreno y especificaciones de Norma Técnica del AyA (2016). Posteriormente se elaboró una capa de puntos que representan la ubicación geográfica de cada edificio o punto de consumo de agua y, con la ayuda de QGIS, se le asignó un valor de demanda a cada uno de los puntos. Ambos archivos se cargaron a la herramienta WaterGEMS mediante el módulo ModelBuilder. Por medio del módulo de interface con Google Earth de CivilCAD, se obtuvieron las curvas de nivel del sitio de estudio, las cuales se sincronizaron a la herramienta de modelación con la ayuda del módulo TRex.

Se realizó la atribución de demandas de los puntos de consumo a la red de distribución, mediante el módulo LoadBuilder por el método de asignación a la de tubería más cercana. Posteriormente se le asignaron valores de diámetro a las tuberías del acueducto respecto a los valores especificados en la Norma Técnica para el Diseño del AyA (2016). Se agregaron valores de dimensionamiento a los tanques de almacenamiento y se realizó la escogencia de la bomba en función de la curva del sistema generada por la herramienta. Posteriormente, se le asignó la curva de demanda obtenida a cada uno de los puntos de consumo del sistema y se crearon otras para representar el comportamiento del hidrante en caso de incendio. Así mismo se establecieron controles en bombas y tanques de almacenamiento para regular su funcionamiento a nivel de modelación.

La modelación realizada fue de tipo hidráulico y se utilizó el método de fricción de Darcy-Weisbach, debido a que éste incluye parámetros adicionales, respecto a otros modelos, que permiten que los resultados de modelación tengan un mayor acercamiento a la realidad.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para la comprensión adecuada de este documento se debe interpretar tanto el punto (.) como la coma (,) como separadores decimales, debido a que algunos de los programas utilizados manejan el Sistema Inglés de Unidades y otros el Sistema Internacional de Unidades. Es importante mencionar que ninguno de los valores numéricos presentes cuenta con separador de miles.

### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO**

Ciudad de los Niños es una institución privada de bienestar social, sin fines de lucro, dedicada a la formación integral de jóvenes. Ubicada en Aguacaliente de Cartago, cuenta con una extensión geográfica aproximada de ciento treinta hectáreas (CDN, 2016), ver figura 4.1. La institución alberga actualmente cerca de quinientos jóvenes y cien funcionarios encargados de labores educativas, de supervisión, de mantenimiento y agropecuarias (Valverde, 2017). Dentro de sus límites geográficos se encuentran tres galpones de pollos, una lechería, corrales de cerdos, vacas, conejos y ovejas, además de espacios de pastoreo. Tienen cinco residencias, catorce albergues, cuatro casas para funcionarios, ocho edificios propios del colegio, oficinas, un invernadero y un comedor. Cada albergue y residencia es administrada por una familia de aproximadamente cinco miembros, por lo que la capacidad de cada tipo de edificio es de 25 y 55, respectivamente (Reyes, 2017).

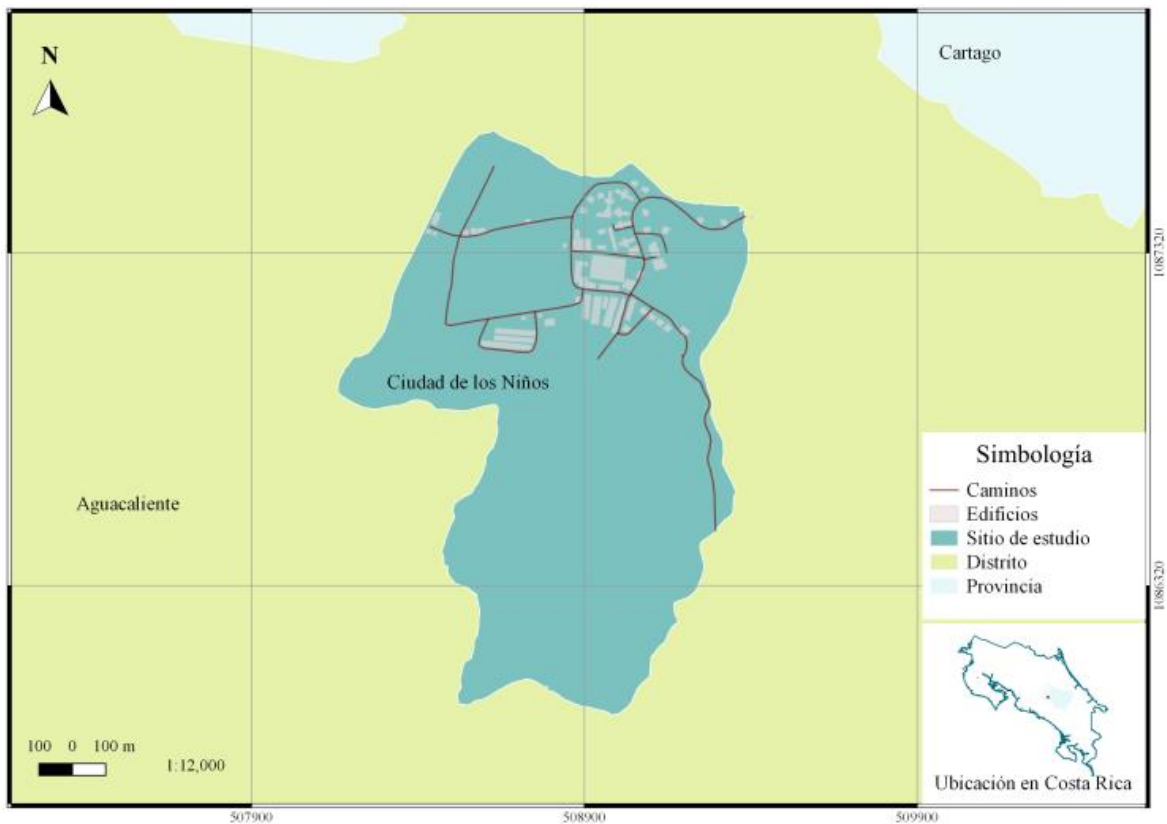


Figura 4.1 Ubicación de la Ciudad de los Niños.

#### 4.2 DESCRIPCIÓN DEL ACUEDUCTO

El sistema de abastecimiento de agua de consumo de Ciudad de los Niños cuenta con cuatro fuentes de captación de agua. Dos de ellas constituyen pozos profundos perforados, uno artesanal y una conexión de agua con el acueducto municipal. Cuenta con dos tanques de almacenamiento, el principal que es el de mayor tamaño, abastece al 88,89% de la totalidad de consumidores de Ciudad de los Niños, mientras que el secundario provee agua únicamente al 10,12%. La red de distribución es ramificada y el mayor porcentaje de su funcionamiento se realiza por gravedad, a excepción de un sector de la finca que requiere de una bomba para abastecerse, dicho sector se excluyó del análisis. En la figura 4.2 es posible observar el mapa del sistema de abastecimiento de agua de Ciudad de los Niños generado, el cual incluye tanques de almacenamiento, fuentes de captación de agua, así como tramos de tubería de distribución y aducción, estos últimos cuentan con un código de color que permite identificar

el diámetro nominal que poseen. El cuadro 4.1 incluye el nombre de algunos de los elementos propios del acueducto y su respectiva abreviatura.

Cuadro 4.1 Abreviatura de algunos de los elementos del acueducto de CDN

Nombre	Abreviatura
Tanque de almacenamiento principal	TAP
Tanque de almacenamiento secundario	TAS
Pozo principal	PP
Pozo finca	PF
Pozo naciente	PN
Conexión con tubería municipal	CTM



Figura 4.2 Mapa del sistema de abastecimiento de agua de consumo de CDN

### 4.3 DIAGNÓSTICO DEL ACUEDUCTO

Los mapas de riesgo permiten visualizar fácilmente la vulnerabilidad de un sistema de abastecimiento ante situaciones naturales. En la figura 4.3 se puede observar que cerca del pozo naciente (PN) se encuentra una falla sísmica que, en caso de que esta se active y produzca sismos de magnitud significativa, puede destruir la captación de agua. El riesgo para incendios fue calculado a partir de datos de meses secos y velocidad del viento (Jiménez, 2003). El riesgo de incendios en Ciudad de los Niños debe ser tomado en cuenta debido a que en el mapa de riesgos se puede visualizar la vulnerabilidad del sistema ante un evento de este tipo.

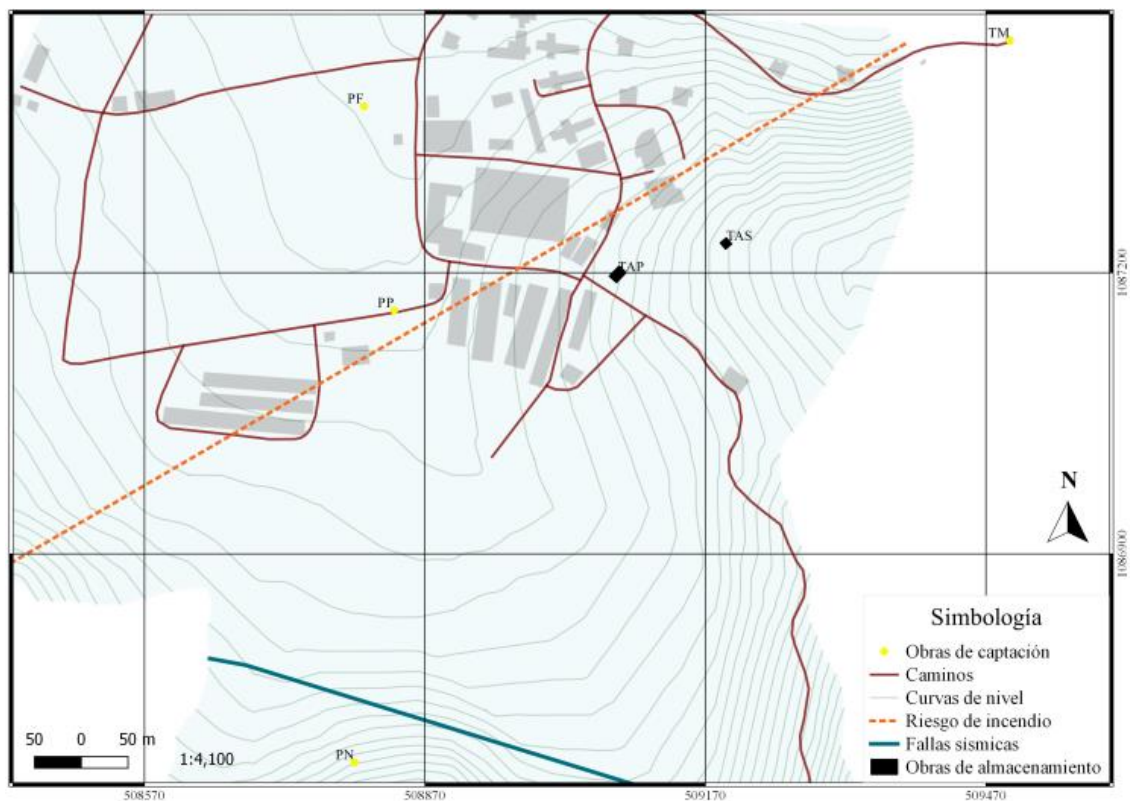


Figura 4.3 Mapa de riesgos potenciales en la Ciudad de los Niños

### 4.3.1 Obras de captación

La figura 4.4 muestra las diferentes coberturas de suelo y permite ubicar las fuentes de abastecimiento dentro de cada tipo de cobertura. El pozo principal y el pozo de finca se ubican dentro de zona de potrero, por lo que no cumplen con el artículo 13° del Reglamento N° 35884-MINAET (2010), que indica que se debe establecer un radio de retiro de al menos 40 metros para brindar al pozo seguridad y protección de las actividades cercanas que se realicen. El pozo naciente se ubica dentro de un sector forestal sin actividades humanas a un radio mayor de 40 metros, por lo que si cumple con el reglamento.

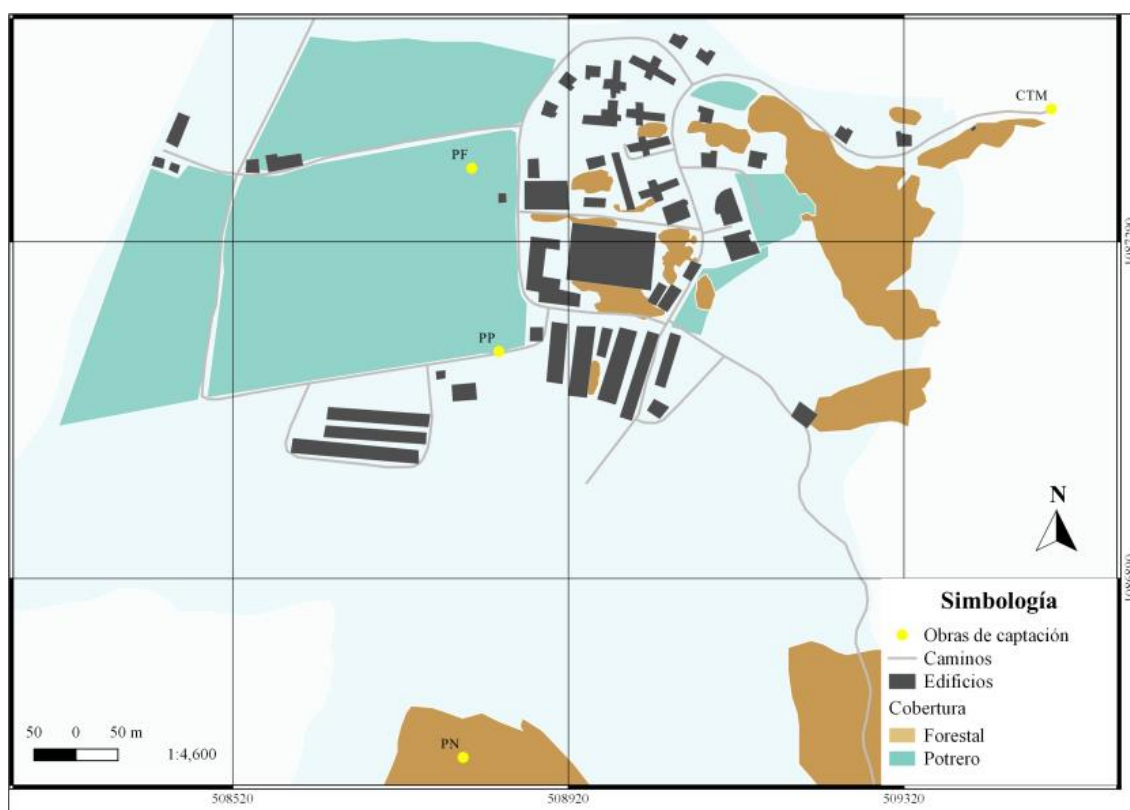


Figura 4.4 Cobertura del suelo en Ciudad de los Niños

En el cuadro 4.2 se incluyen las coordenadas geográficas que representan la ubicación de cada fuente de abastecimiento. La ubicación del pozo finca y del pozo principal fueron determinadas con la estación total, mientras que la del pozo naciente con el navegador GPS. La ubicación de la conexión municipal se aproximó a partir del uso de Google Earth y CivilCAD.

Cuadro 4.2 Ubicación geográfica de las fuentes de captación de agua en CDN

<b>Fuente</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Latitud (m)</b>	<b>Elevación (m)</b>
PP	508837,10	1087159,88	1337,22
PF	508632,61	1087361,85	1336,70
PN	508794,01	1086677,17	1363,03
CTM	509490,93	1087449,40	1319,92

#### 4.3.1.1 *Pozo Principal*

El pozo es perforado y tiene una profundidad de 44 metros. La bomba utilizada es centrífuga sumergible, su potencia es de 1,5 HP y está ubicada a 30 metros de profundidad (Reyes, 2017). Su curva característica puede observarse en la figura 9.1. Posee una casetilla sin techo y malla como pared que lo protegen del acceso de personas y animales. El acceso al pozo es bueno, se encuentra junto a una calle de lastre de un carril.

Se realizó un aforo por volumetría en el pozo, la medición se hizo por triplicado y se obtuvo un valor promedio de 2,76 l/s. Esta es la fuente de mayor aporte de agua de consumo de Ciudad de los Niños. A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, según su escala de evaluación, que este pozo cuenta con un nivel de riesgo del 30%, ver cuadro A.2.2, apéndice 2.

#### 4.3.1.2 *Pozo Finca*

Es perforado y tiene una profundidad de 35 metros. Utiliza una bomba centrífuga de 1,5 HP que se encuentra a una profundidad de 21 metros (Reyes, 2017). Cuenta con una amplia caseta con techo que protege tanto al pozo como al equipo de bombeo del ingreso de personas y de condiciones ambientales adversas. El acceso al pozo es bueno, se encuentra a unos 25 metros de una calle de lastre de un carril.

El agua obtenida por este pozo es transportada mediante bombeo a la lechería donde es usada únicamente para actividades de lavado, debido a que el agua no presenta las condiciones adecuadas para ser usada para consumo humano o animal, por lo que se descartó su aprovechamiento para el modelamiento del acueducto mejorado. Se realizó un aforo



volumétrico en una tubería de salida, instalada para este fin, la medición se hizo por triplicado y se obtuvo un valor de caudal promedio de 1,89 l/s.

A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, respecto a su escala de evaluación, que este pozo cuenta con un nivel de riesgo del 40%, ver cuadro A.2.3, apéndice 2.

#### 4.3.1.3 *Pozo Naciente*

El pozo es de tipo artesanal, tiene una profundidad de 3 metros. El acceso a la captación es bueno, la mayoría del recorrido se puede realizar por un camino de lastre que termina a unos 100 metros de la captación, distancia que se debe recorrer caminando. El agua obtenida es trasladada por gravedad al tanque de almacenamiento principal de CDN.

A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, respecto a su escala de evaluación, que este pozo cuenta con un nivel de riesgo del 40%, ver cuadro A.2.1, apéndice 2. Al momento de la inspección la naciente se encontraba seca, debido a la inestabilidad de abastecimiento y al impedimento para calcular su caudal aportado, se prescindió de su existencia para fines de cálculo, ver figura A.1.3, apéndice 1.

#### 4.3.1.4 *Agua municipal*

En 2016, se instaló una conexión de tubería a la red de agua municipal tras un acuerdo de la Municipalidad de Cartago de proveer a la Ciudad de los Niños con una tubería de 12,7 mm, este tramo de tubería no cuenta con medidor de caudal, por lo que se estima que el caudal brindado es de 0,05 l/s, aproximadamente. En el punto de conexión de CDN a la tubería municipal, la presión de servicio varía entre 24,61 mca en el día y 45,70 mca en la noche (Urbina, 2017).

### 4.3.2 **Tanques de almacenamiento**

El tanque de almacenamiento principal cuenta con una capacidad de almacenamiento total de 124,55 m<sup>3</sup>, mientras que el tanque secundario de 15,36 m<sup>3</sup>. En el cuadro 4.3 se muestra la posición geográfica de los dos tanques de almacenamiento de CDN.

Cuadro 4.3 Ubicación geográfica de los tanques de almacenamiento de CDN

Tanque	Longitud	Latitud	Elevación
Principal	509074,67	1087199,29	1347,46
Secundario	509192,42	1087231,66	1365,06

#### 4.3.2.1 *Tanque de almacenamiento principal*

Está compuesto por tres tanques de almacenamiento conectados entre sí por tuberías de PVC de 76,2 mm, la distribución de la estructura se puede ver en la figura 8.2. Se trata de un tanque enterrado, el material de su estructura es concreto y ha sido construido por etapas. El acceso al tanque de almacenamiento es bueno, se encuentra en una zona de pastoreo de ovejas, a 15 metros de la calle principal de CDN, la cual posee dos carriles y está pavimentada. De existir filtraciones en el tanque de almacenamiento, se puede presentar contaminación en el agua debido a las excretas de los animales.

Cuenta con una malla de protección inmediata en malas condiciones, lo que permite el acceso de personas o animales. Las tapas de inspección poseen un borde perimetral que impide el ingreso de agua de lluvia, sin embargo, carecen de un sistema seguro de cierre. No cuenta con escaleras internas para el ingreso ni respiraderos. Además, nunca ha sido pintado, por lo que la acumulación de sedimentos en el fondo, así como algas y hongos en las paredes del tanque es evidente, ver figura A.1.2, apéndice 1.

La ineficiencia de la mezcla de agua en el tanque y su movimiento, a través de los compartimentos, que se da únicamente por la parte inferior, genera una capa de sólidos que flota en la superficie del agua, ver figura 8.4. La presencia de sólidos en la matriz del agua evidencia el ingreso de los mismos al tanque, lo que puede deberse a fugas en la red de aducción, en las paredes o el fondo del tanque, así como a la presencia de sedimentos en las fuentes de captación. A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, según su escala de evaluación, que este tanque de almacenamiento cuenta con un nivel de riesgo del 80%, ver cuadro A.2.4, apéndice 2.

Respecto a la prueba de nivel realizada, se determinó el comportamiento del tanque en las diferentes horas del día, ver figura 4.5. Los sectores ascendentes de la curva representan un

mayor caudal de suministro que el de demanda, por lo que el tanque empieza el proceso de llenado. El consumo de agua de CDN comienza cerca de las 4:30 a.m. de la mañana, a partir de ese punto se aprecia un declive en la curva de variación de nivel del tanque. Las fuentes que abastecen el tanque de almacenamiento, no proporcionan un caudal continuo durante las 24 horas del día, por lo que el proceso de vaciado y llenado en ciertos momentos se representa en la curva de manera pronunciada.

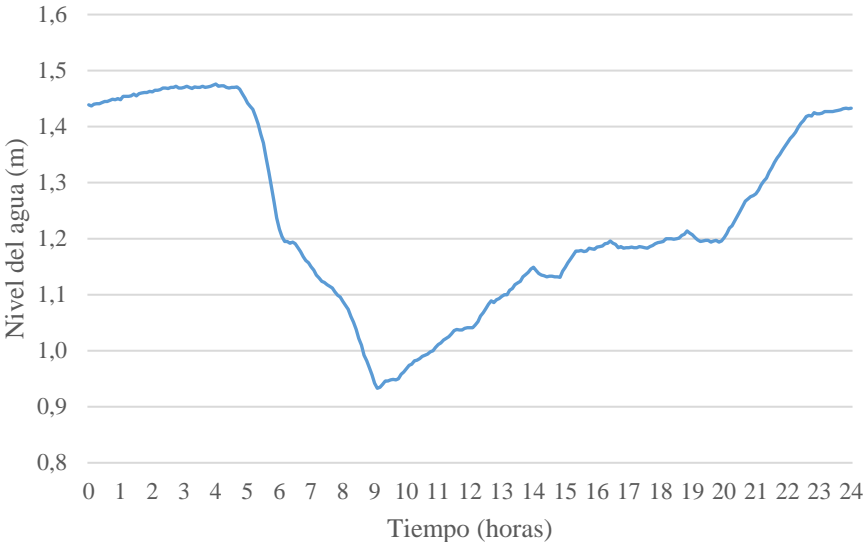


Figura 4.5 Variación de nivel en el tanque de almacenamiento principal

En la figura 4.6, se puede observar la variación de caudal en el tanque de almacenamiento. Los valores de caudal positivos representan periodos de tiempo en que el tanque está almacenando agua y los negativos representan los periodos de tiempo en que el tanque está descargando agua a la red de distribución. El trazado de la curva se realizó a partir de datos de caudal obtenidos en intervalos de 10 minutos, partiendo de las 0:00 a.m. para brindar una mejor visualización de la misma. La curva indica que, en términos generales, los picos máximos de demanda pueden ser hasta tres veces mayores que los picos máximos de suministro.

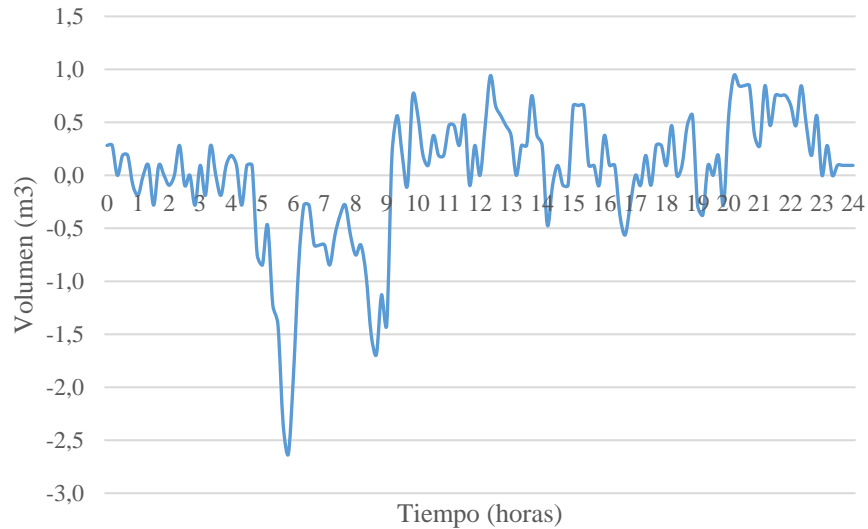


Figura 4.6 Variación de caudal en el tanque de almacenamiento principal

La variación del caudal de suministro en CDN durante 24 horas, se puede observar en la figura 4.7. Para la determinación del periodo del día en que se cuenta con agua municipal, se utilizó como referencia la curva de variación horaria del acueducto de Santa Cruz (Bejarano, 2013), la cual muestra que el periodo de mayor consumo en un día de mayor demanda inicia cerca de las 5:30 a.m. y finaliza a las 7:00 p.m. aproximadamente. Según (Urbina, 2017), la variación de presión en la red de distribución del acueducto municipal de Cartago se debe a la demanda de las comunidades abastecidas. Suponiendo que el acueducto de Cartago y el de Santa Cruz se comportan de la misma manera, se determinó que a partir de las 5:30 a.m. hasta las 7:50 p.m. Ciudad de los Niños no cuenta con aporte de agua municipal. Se realizó una visita en la cual se determinaron los niveles que debe tener el tanque de almacenamiento principal para que la bomba del pozo principal se apague o se encienda. Se determinó que la bomba se enciende cuando el nivel del agua es de 1,10 m y se apaga al llegar a 1,50 m, por lo que, a partir de los resultados de la prueba de nivel, se estimó el periodo de tiempo en que el pozo principal abastece al TAP. Existe un periodo de tiempo en el tanque principal no posee un caudal de entrada, lo cual es representado por el alto grado de inclinación de la curva de variación de nivel en ese periodo de tiempo.

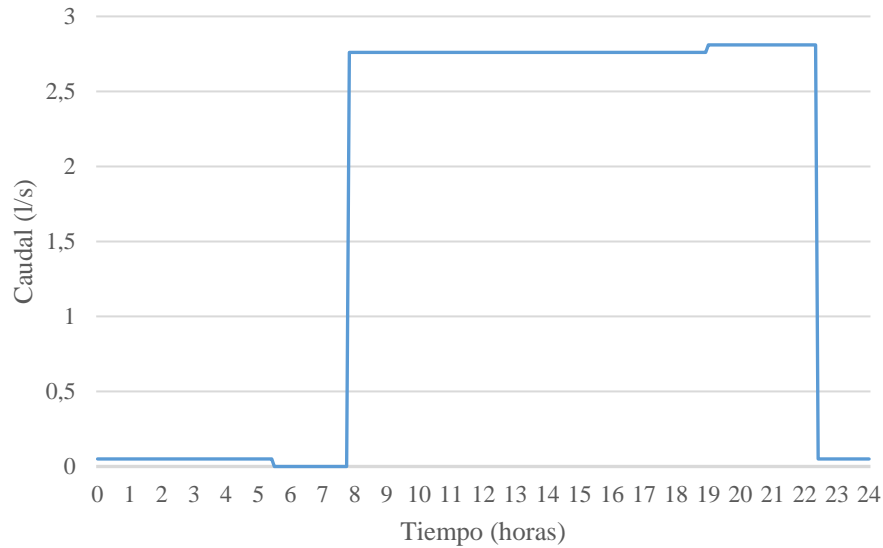


Figura 4.7 Variación del caudal de suministro en Ciudad de los Niños durante un día

#### 4.3.2.2 *Tanque de almacenamiento secundario*

Consiste en un solo tanque sin compartimentos. El material de su estructura es concreto y se encuentra enterrado. Fue creado por la necesidad de abastecer edificios construidos a mayor altitud que el tanque de almacenamiento principal. El agua que abastece el tanque secundario proviene del tanque principal y abastece a tres albergues, el templo y un abrevadero para ovejas. El acceso al tanque es bueno, se debe hacer caminando y se encuentra a aproximadamente 180 m de una calle de lastre de un carril.

El tanque de almacenamiento se encuentra aislado de actividades que puedan representar un riesgo para el agua contenida dentro del tanque, en caso de que posea grietas que permitan el ingreso de contaminantes. No cuenta con una malla de protección que impida el acceso de personas o animales. Las tapas de inspección cuentan con un borde perimetral que impide el ingreso de agua de lluvia, sin embargo, carecen de un sistema seguro de cierre. No cuenta con escaleras internas para el ingreso ni con respiraderos. El tanque presenta sedimentos en el fondo y nunca ha sido pintado, por lo que está expuesto al crecimiento de microorganismos en sus paredes. A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, según su escala de evaluación, que este tanque de almacenamiento cuenta con un nivel de riesgo del 70%, ver cuadro A.2.5, apéndice 2.

Respecto a la prueba de nivel realizada en el tanque secundario, se determinó que la bomba que lo abastece cuenta con cuatro periodos de bombeo que tardan aproximadamente una hora, ver figura 4.8. Según (Bentley Systems et al., 2007) es posible determinar los controles de la bomba a partir de las curvas de nivel de agua de los tanques de almacenamiento. Así, los puntos más bajos de la curva representan el nivel de agua que debe tener el tanque para que la bomba se encienda y los puntos más altos, el nivel que debe tener para que la bomba se apague. En la curva de variación de nivel en el tanque secundario, la bomba que lo abastece se enciende cuando la altura del agua es de 0,05 metros y se apaga cuando alcanza los 0,40 metros. El tramo de la curva que se encuentra entre las primeras cuatro horas del día puede representar una pérdida de caudal por fugas en el tanque o en el sistema de distribución, ya que, las actividades en CDN inician aproximadamente a las 5:00 a.m. y al compararse ese tramo de pendiente negativa con los otros de la curva, se puede observar que la inclinación es menos pronunciada, lo que representa un flujo de salida anormal del tanque.

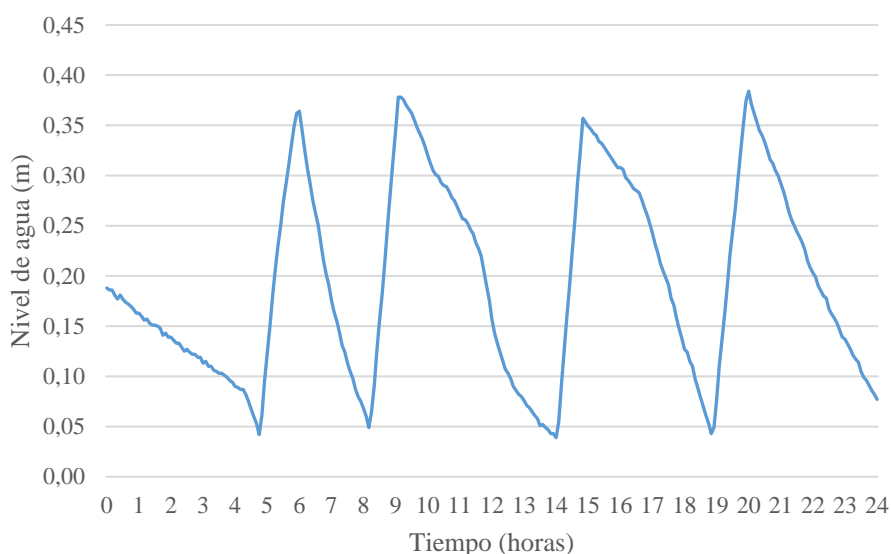


Figura 4.8. Variación de nivel en el tanque de almacenamiento secundario.

### 4.3.3 Obras para el transporte de agua

Ciudad de los Niños cuenta con tuberías de aducción y distribución dentro de su sistema de abastecimiento de agua de agua de consumo. En la figura 4.9 se puede observar un mapa que representa por un código de color las tuberías, tanto de aducción como de distribución, que

fueron sometidas a modelación en CivilCAD para conocer su comportamiento en el momento más crítico de un día normal de funcionamiento. En total, se realizaron modelaciones para tuberías de aducción y cinco para tuberías de distribución.

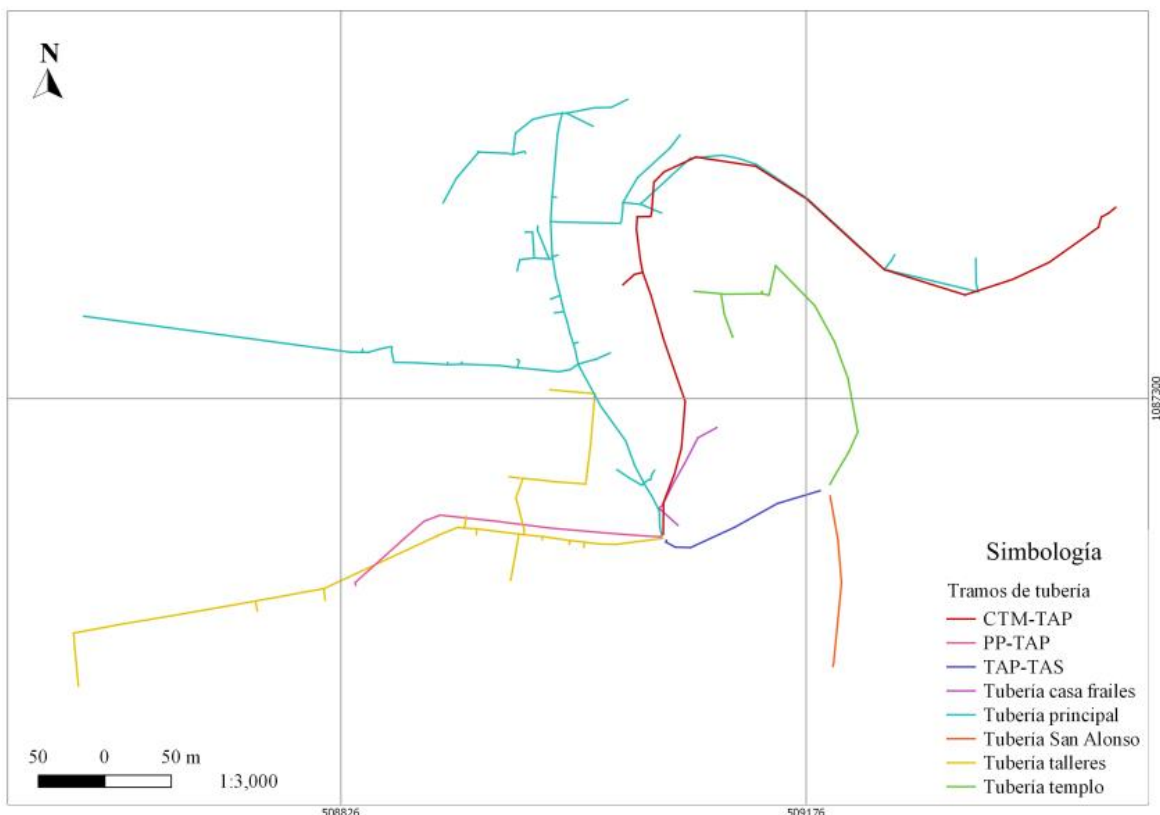


Figura 4.9 Tramos de tubería modelados en CivilCAD

#### 4.3.3.1 *Tuberías de aducción*

La totalidad de líneas de aducción son de PVC y se encuentran enterradas a una profundidad aproximada de 0,8 metros. La variación de diámetros de estas tuberías se encuentra entre 12,7 mm y 101,6 mm, los cuales son determinados por las necesidades del sistema de bombeo y el acuerdo de conexión a la tubería del acueducto municipal. Las líneas de aducción no han presentado reportes de fugas. A partir de la aplicación del Formulario de Inspección Sanitaria de Acueductos del AyA (2015) se determinó, según su escala de evaluación, las líneas de aducción y de distribución cuentan con un nivel de riesgo del 60%, ver cuadro A.2.6, apéndice 2.

#### 4.3.3.1.1 Tubería PP-TAP

Transporta el agua desde el pozo principal (PP) al tanque de almacenamiento principal (TAP). La tubería de descarga de la bomba es de 50,8 mm y cuenta con una longitud de 251,896 m. Utiliza una bomba sumergible de 1,5 HP que se encuentra a una profundidad de 30 metros (Reyes, 2017). La línea de aducción se encuentra completamente enterrada y no cuenta con reportes de fugas.

Mediante el uso de la herramienta CivilCAD se realizó un análisis hidráulico de la tubería. En la figura 4.10 se observa un resumen del cumplimiento de los valores de presión obtenidos tras la modelación de la tubería, la cual indica que más del 40% de los nodos analizados cuentan con valores negativos de presión y con un aproximado de 80% de los datos menores al mínimo establecido por la Norma Técnica del AyA (2016).

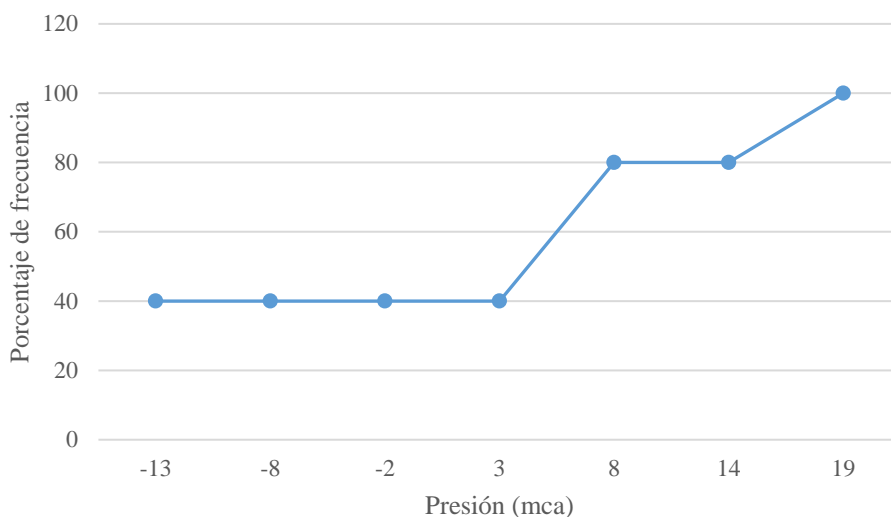


Figura 4.10 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería PP-TAP realizada en CivilCAD

En el cuadro A.3.1, apéndice 3, se puede observar en detalle los resultados obtenidos en cada uno de las secciones de la tubería PP-TAP. CivilCAD requiere la incorporación de valores de caudal y presión en el nodo de alimentación. El caudal utilizado fue de 2,76 l/s, valor obtenido previamente por volumetría, mientras que el valor de presión se obtuvo a partir de la curva característica de la bomba (ver figura B.1.1, anexo 1), la cual requiere que su funcionamiento se lleve a cabo a una presión de trabajo de 4,19 mca para ofertar el flujo de



interés. Los valores de color rojo presentes en el incumplimiento respecto a la Norma Técnica del AyA (2016). En el cuadro de resultados se observa que, al final del tramo, se obtienen velocidades menores al mínimo establecido en la norma, así como presiones negativas. Estas indican que la presión de descarga de la bomba no es suficiente para trasladar el caudal de agua muestreado hasta el tanque de almacenamiento principal.

#### 4.3.3.1.2 Tubería CTM-TAP

La tubería que transporta el agua municipal al tanque de almacenamiento, tiene una longitud total de 759,09 m y cuenta con desviaciones a la casetilla de seguridad y a la fuente antes de abastecer al tanque de almacenamiento. No cuenta con medidor, por lo que fue imposible conocer los valores iniciales mediante pruebas en campo.

Se realizaron dos análisis hidráulicos de la tubería respecto a los valores de presión brindados por (Urbina, 2017), utilizando CivilCAD como herramienta de cálculo. El primero se realizó para una presión de 45,70 mca y un caudal de 0,05 l/s, que representa las condiciones con las que cuenta la tubería en horas de la noche, ver cuadro A.3.2, apéndice 3. El valor de caudal inicial asignado corresponde al flujo máximo obtenido para que la presión máxima ofrecida por el acueducto municipal sea capaz de trasladar el agua hasta el tanque de almacenamiento principal. Mientras que al segundo análisis se le aplicó un único cambio que fue la asignación de 24,61 mca como valor de presión inicial, con el fin de representar su comportamiento en horas del día, ver cuadro A.3.3, apéndice 3.

En la figura 4.11 se puede observar de forma gráfica el cumplimiento de la presión en la tubería CTM-TAP respecto a la Norma Técnica del AyA (2016). Se realizaron dos series de datos para representar el comportamiento de la tubería tanto en la noche como en el día. En horas del día, aproximadamente el 40% de los nodos estudiados presentan valores negativos de presión y más del 50% de los datos no cumplen con lo establecido por la Norma Técnica del AyA (2016), evitando que el tanque de almacenamiento principal pueda abastecerse con el agua provista por el Acueducto Municipal de Cartago. En cuanto a su comportamiento nocturno, se obtiene que menos del 40% de los nodos incumplen con lo establecido por el AyA (2016), sin embargo, no se presentan presiones negativas permitiendo que el transporte de agua hasta el TAP sea efectivo.

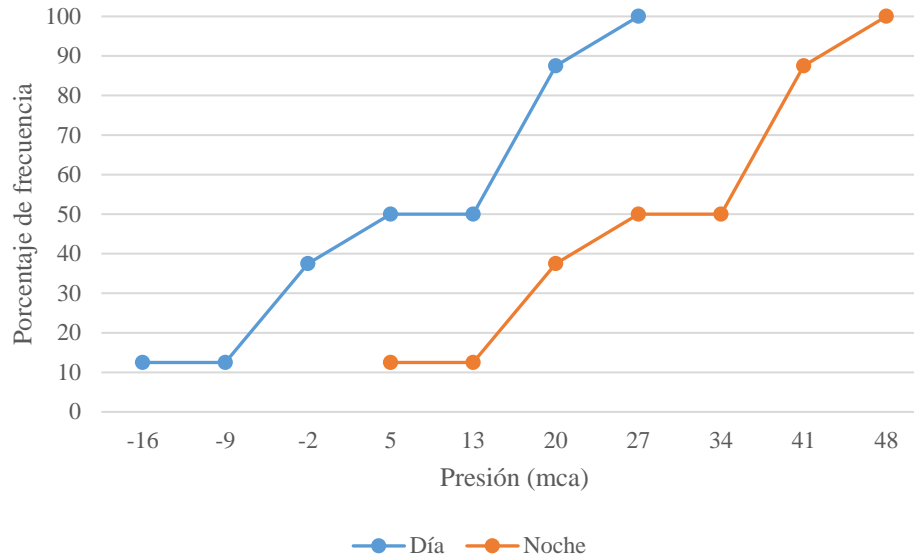


Figura 4.11 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería TM-TAP realizada en CivilCAD

En ambos análisis se presenta incumplimiento a la normativa del AyA (2016) respecto a los valores de velocidad en la tubería, ya que no alcanzan el mínimo establecido. Los cuadros A.3.2 y A.3.3 del apéndice 3, permite observar con mayor detalle los resultados obtenidos en tras la modelación y su comportamiento tramo a tramo de la tubería CTM-TAP.

#### 4.3.3.1.3 Tubería TAP-TAS

Esta tubería cuenta con 129,12 m y el agua es transportada de manera directa por bombeo desde el tanque de almacenamiento principal (TAP) hasta el tanque de almacenamiento secundario (TAS). Tiene un diámetro de 38,1 mm y la bomba utilizada es de 2,5 HP para una carga de succión de 2 mca, su curva característica se puede ver en la figura B.1.2, anexo 1.

Mediante el uso de la herramienta CivilCAD se realizó un análisis hidráulico de la tubería de aducción, ver cuadro A.3.4, apéndice 3. Debido a la imposibilidad de conocer el dato de caudal de descarga de la bomba, se extrajeron valores obtenidos mediante la prueba de nivel en el tanque secundario y, al conocer las dimensiones del tanque se puede determinar las variaciones de volumen respecto a un intervalo de tiempo definido. Los valores utilizados corresponden al tercer periodo de bombeo y fueron promediados. El caudal obtenido se relacionó con la curva característica de la bomba utilizada en CDN para este tramo de tubería. Por lo que los valores iniciales fueron 1,02 l/s y 48,50 mca. En el cuadro se puede observar

que al final del tramo de tubería se cuenta con una presión de 28,39 mca, lo cual indica que el funcionamiento de la bomba es adecuado.

#### 4.3.3.2 *Tuberías de distribución*

La totalidad de la red de distribución (RD) está compuesta por tubería de PVC y se encuentra enterrada a una profundidad aproximada de 0,8 metros. Su configuración es ramificada, no cuenta con medidores y su variación de diámetros se encuentra entre 12,70 mm y 76,20 mm. En la figura 4.12 se observa la variación de longitud entre los diferentes tramos de tubería correspondientes a la red de distribución. Cada uno de los edificios cuenta con un tanque de almacenamiento de 2 m<sup>3</sup> y una bomba para trasladar el agua almacenada hasta cada sitio de consumo dentro del edificio. Generalmente, se deben reparar más de diez fugas por semana a lo largo de la red de distribución. La RD se analizó a partir de la cantidad de salidas en los tanques de almacenamiento, generando así cinco ramales de tubería para la distribución de agua a cada consumidor de CDN.

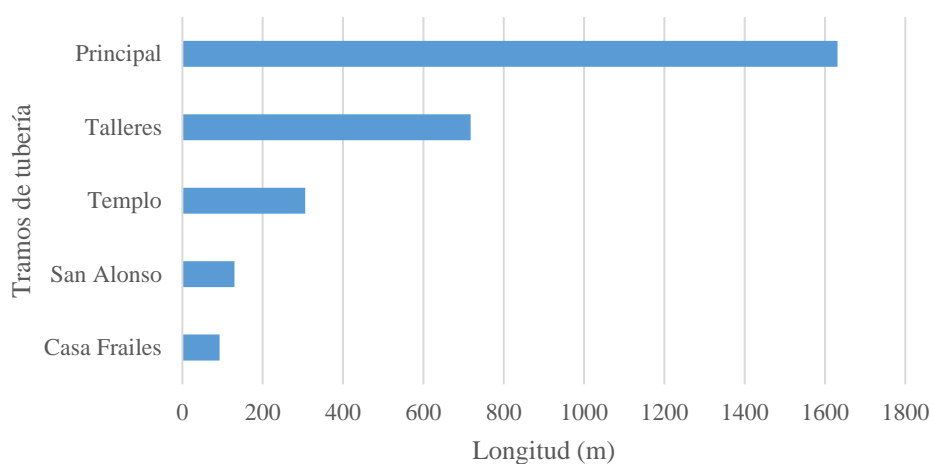


Figura 4.12 Longitud total de los tramos de tubería de la red de distribución en estudio

##### 4.3.3.2.1 Tubería principal

Este ramal de RD es la más grande de Ciudad de los Niños, abastece al 67,79% de la totalidad de consumidores y atraviesa el sector de mayor concentración de edificaciones. La longitud total de este segmento de distribución es de 1631 m.

Mediante el uso de CivilCAD se realizó el cálculo hidráulico de este sector de la red de distribución. Está compuesta por 74 tramos de tubería separados por accesorios de reducción y de cambio de dirección de flujo. Los nodos de mayor interés en el análisis son aquellos que representan puntos de consumo tales como residencias, albergues, oficinas, espacios para recreación y demás. Los valores iniciales utilizados en la modelación para este segmento de distribución fueron 10,36 mca y 10,93 l/s.

En la figura 4.13 se presenta un resumen de los resultados de presión obtenidos mediante la modelación realizada en CivilCAD, la cual indica que el 100% de los nodos cuentan con presiones por debajo de 15 mca, que corresponde al valor mínimo aceptable de la Norma Técnica del AyA (2016). Indicando también que más del 40% de los nodos cuentan con valores negativos, representando la ausencia de abastecimiento en muchos de los edificios que reciben agua de esta tubería. En el cuadro A.3.8, apéndice 3, se puede observar con mayor detalle los valores de presión y velocidad obtenidos en cada nodo y tramo de tubería. Gran parte de los valores de velocidad obtenidos suelen superar el máximo permitido por la normativa del AyA (2016), alcanzando valores de hasta 16,82 m/s.

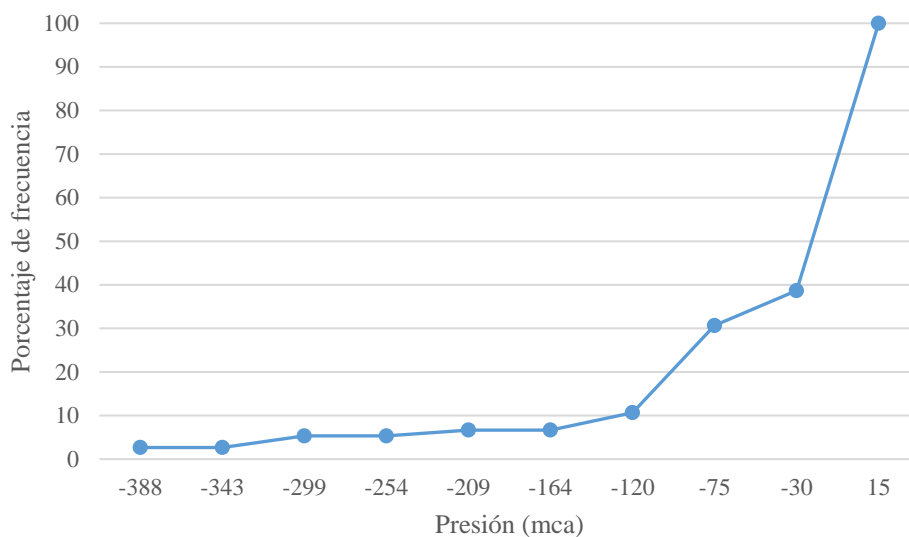


Figura 4.13 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería principal realizada en CivilCAD

Debido a serios problemas de abastecimiento dentro del acueducto, Ciudad de los Niños optó por la instalación de tanques de almacenamiento y bombas en cada uno de los edificios para poder hacer uso del agua. El propósito de la instalación era propiciar que los tanques, que se encuentran sobre la superficie del suelo, se abastecieran de agua en horas de demanda mínima y mediante la bomba centrífuga impulsar el agua hasta cierta altura dentro de cada edificio, para facilitar actividades, por ejemplo, de higiene personal a los ocupantes de cada edificio, puesto que las condiciones del acueducto existente no permiten que el agua pueda abastecer por gravedad a los edificios. De esta manera, los valores negativos de presión obtenidos en el modelo confirman la precaria situación actual por la que atraviesa el sistema de abastecimiento de agua.

#### 4.3.3.2.2 Tubería talleres

Abastece edificios para uso educativo, tres galpones de pollos, la casa de un encargado de finca, un vivero y dos albergues. La longitud total del segmento es de 717,66 m con variaciones de diámetro entre 12,7 mm y 50,8 mm. Abastece al 10,82% de la totalidad de consumidores de Ciudad de los Niños.

En el cuadro 4.14 se muestra un resumen de los resultados obtenidos tras la modelación realizada en CivilCAD para este tramo de tubería, el cual indica que cerca del 96% de los nodos analizados cuentan con valores negativos de presión, mientras que el 100% de los resultados son menores a 13 mca, lo que indica incumplimiento de la Norma Técnica del AyA (2016). En el cuadro A.3.9, apéndice 3, se presentan los resultados del análisis realizado con mayor detalle, observándose la variabilidad de los resultados obtenidos respecto a velocidad en las secciones de la tubería modelada. La funcionalidad en el abastecimiento de agua de esta tubería coincide con la de la tubería principal y, debido a los mismos problemas de presión presentados, fue necesaria la implementación de tanques de almacenamiento y bombas en cada uno de los edificios abastecidos por la tubería talleres. Situación que fundamenta los resultados obtenidos en la modelación. Los valores iniciales asignados fueron 10.36 mca y 10.93 l/s.

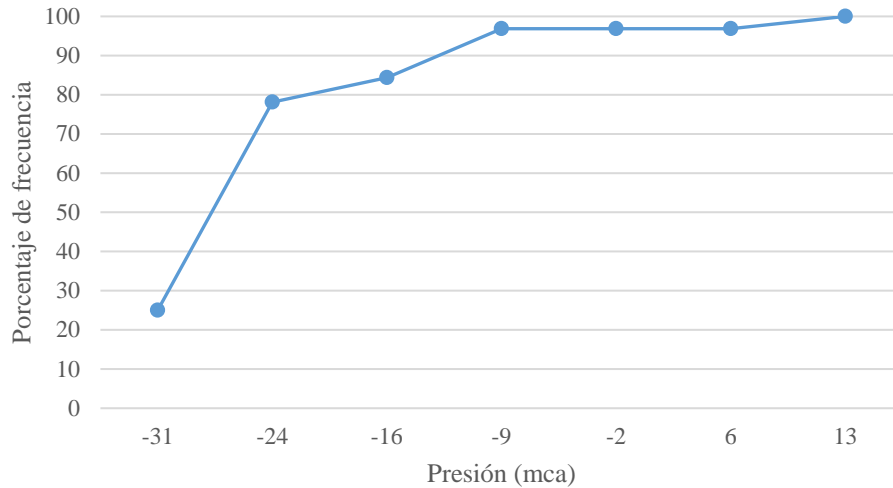


Figura 4.14 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería talleres realizada en CivilCAD

#### 4.3.3.2.3 Tubería a casa frailes

Ofrece abastecimiento únicamente a la casa donde residen los frailes. La longitud total del segmento es de 92,78 m, con diámetros de 38,1 mm y 76,2 mm. Este tramo de tubería abastece al 0,67% de la total de consumidores de CDN.

En el cuadro A.3.5, apéndice 3, se muestran los resultados del cálculo hidráulico para esta tubería. Los valores de alimentación asignados fueron 8,67 l/s y 9,62 mca. El resultado de presión para el nodo que representa casa frailes es negativo, lo que indica que la condición inicial de presión en el segmento de distribución no es capaz de trasladar el agua hasta el punto de interés. Respecto al desempeño de la tubería respecto a la normativa del AyA (2016), no se cumple con valores de presión en los nodos y para el segundo tramo se presenta incumplimiento respecto a la velocidad del flujo.

#### 4.3.3.2.4 Tubería Templo

Ofrece abastecimiento al 18,25% de la totalidad de los consumidores en CDN. Este segmento cuenta con una longitud total de 305,88 m e inicia en el TAS y finaliza en el sector en que se encuentra el templo. La variación de los diámetros de tubería se encuentra entre 12,7 mm y 25,4 mm y cada tramo de tubería está dividido por accesorios de cambio de dirección de flujo.

Se realizó una modelación en CivilCAD para este tramo de tubería. En la figura 4.15 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos, donde se indica que el 100% de los nodos cuenta con valores positivos de presión, mientras que más del 90% de los nodos cumplen con lo establecido por la Norma Técnica de AyA (2016).

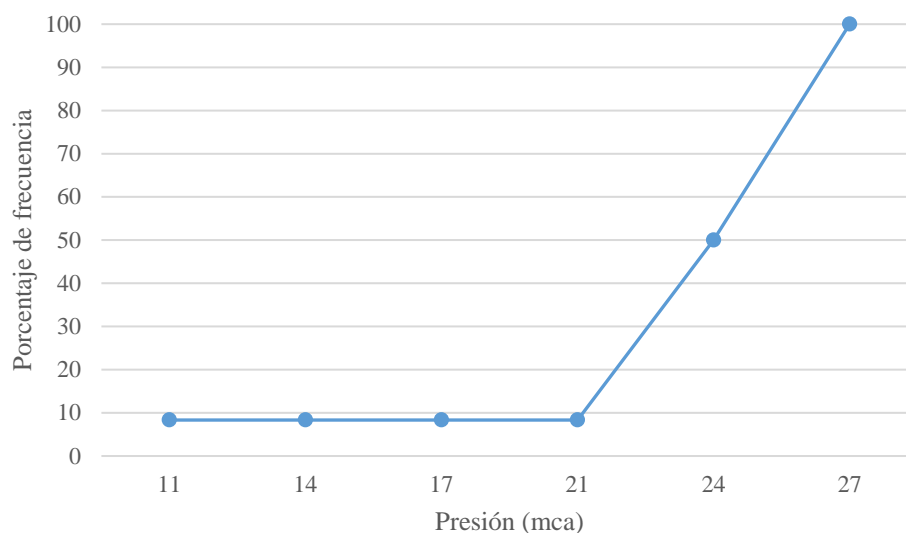


Figura 4.15 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación de la tubería templo realizada en CivilCAD

En el cuadro A.3.6, apéndice 3, se pueden observar los resultados obtenidos en la modelación con mayor detalle. Los valores iniciales de alimentación asignados fueron 0,44 l/s y 8,87 mca. A pesar de que el valor de presión en el nodo inicial es menor a lo establecido por la normativa del AyA (2016), la elevación del tanque de almacenamiento secundario respecto a los puntos de consumo genera una ventaja en la adquisición de presión durante el recorrido por la tubería. En este caso, la eficiencia del suministro de agua depende únicamente de la disponibilidad del agua. El parámetro de velocidad se cumple respecto a la normativa del AyA (2016) en la minoría de los tramos que componen este segmento de distribución.

#### 4.3.3.2.5 Tubería San Alonso

Esta tubería de distribución ofrece abastecimiento únicamente al albergue San Alonso (ASA), que representa al 2,47% de la totalidad de consumidores de CDN. La longitud total de la tubería es de 129,69 m y cuenta con un único tramo de tubería de 25,4 mm.

Para el cálculo hidráulico se utilizó la herramienta CivilCAD, ver cuadro A.3.7, apéndice 3. Los valores iniciales asignados al nodo de alimentación fueron de 0,44 l/s y 8,87 mca. El valor de presión en el nodo final de la tubería, que representa al albergue San Alonso, es positivo y aumenta debido a que el flujo recorre la tubería desde un punto de mayor elevación (TAS) a uno de altitud menor (ASA), sin embargo, no cumple con lo establecido en la normativa del AyA (2016). La velocidad del tramo se encuentra dentro del rango permisible establecido por la normativa del AyA (2016).

#### 4.4 PROPUESTA DE DISEÑO DEL ACUEDUCTO

En esta sección se expondrán los parámetros necesarios para la realización de la propuesta de diseño utilizando WaterGEMS como motor de cálculo, así como los resultados obtenidos tras la modelación.

##### 4.4.1 Parámetros básicos

###### 4.4.1.1 Población de diseño

Ciudad de los Niños constituye una pequeña comunidad que no crece conforme proyecciones de crecimiento establecidos, sino en función del crecimiento en infraestructura y actividades de servicios y agroindustriales planificadas. A partir de los datos brindados por Reyes (2017) el crecimiento de la institución en infraestructura se realizará básicamente mediante la construcción de cuatro albergues o dos residencias, con el fin de hospedar a un máximo de 700 estudiantes en los próximos 20 años, además de la construcción de un edificio para ser usado por el colegio. El crecimiento en infraestructura implica la contratación de personal para solventar las necesidades para las que el edificio fue construido en primera instancia, ese personal finalmente formará parte de la población de consumo de agua de la institución y la creación de otras edificaciones para fortalecer el desempeño de las actividades implementadas.

El crecimiento de la población de animales para actividades agroindustriales se encuentra bien definido por Ciudad de Niños. A excepción de los pollos, que cuentan con límite máximo poblacional debido a la capacidad de los galpones, el crecimiento anual de la



población de todas las otras especies de animales es de 5%, (Arias, 2017). En el cuadro 4.4, se puede observar la población actual y futura de los animales en la institución.

Cuadro 4.4 Población de animales en Ciudad de los Niños

<b>Especie</b>	<b>Población actual</b>	<b>Población futura</b>
Vacas lecheras	194	388
Vacas de engorde	55	110
Ovejas	190	380
Conejos	10	20
Cerdos	18	36
Búfalos	2	4
Pollos	45000	50000

Conforme a la capacidad de cada edificio y los planes de crecimiento, se estableció la población futura de la institución. La Norma Técnica para Diseño del AyA (2016) expone periodos de diseño para los diferentes elementos del acueducto, optando por un periodo de 20 años, que es el establecido para redes de distribución de agua. Así mismo indica que se debe multiplicar el valor de demanda para cada actividad por el número de consumidores y dividirlo respecto a la dotación mínima residencial para obtener unidades equivalentes. Se utilizaron los valores de dotación establecidos por el IMN (2004) en conformidad con las actividades realizadas en la institución. Se determinó que la población actual expresado en unidades equivalentes es de 1220,91 y la futura es de 1595,84.

#### 4.4.2 Estimación de la demanda

La estimación de la demanda se ejecutó a partir uso de agua requerido en las actividades realizadas en cada punto de consumo, multiplicado por la cantidad de usuarios relacionados a cada actividad. El Manual Técnico del Departamento de Aguas (2004) establece valores de demanda para cada tipo de uso del agua, clasificándolos por tipología, subgénero y tipo de actividad. Tomando en cuenta que CDN se encuentra dentro del Gran Área Metropolitana (GAM), se utilizó 375 l/p/d como valor de dotación mínima para uso residencial. En el cuadro 4.5 se presentan las dotaciones mínimas utilizadas para el cálculo de demanda de las diferentes actividades realizadas en CDN.

Cuadro 4.5 Dotación mínima para los usos de agua en CDN. Adaptado de (IMN, 2004)

<b>Tipología</b>	<b>Subgénero</b>	<b>Tipo de actividad</b>	<b>Dotación mínima</b>
Residencial	GAM	Hospedaje	375 l/p/d
Servicio	Oficinas	Cualquier tipo	20 l/m <sup>2</sup> /d
Servicio	Educación	Media y superior	25 l/estudiante/d
Servicio	Salud	Enfermería	800 l/cama/d
Servicio	Recreación	Deportes al aire libre con baño y vestidores	150 l/asistente/d
Servicio	Recreación	Alimentos y bebidas	12 l/comida
Servicio	Espacios abiertos	Jardines y parques	5 l/m <sup>2</sup> /d
Servicio	Recreación	Entretenimiento	10 l/asiento/día
Servicio	Independiente	Trabajador	100 l/trabajador/día
Agroindustrial	Abrevadero	Bovinos	70 l/cabeza/d
Agroindustrial	Abrevadero	Ovejas	40 l/cabeza/d
Agroindustrial	Abrevadero	Cerdos	15 l/cabeza/d
Agroindustrial	Abrevadero	Pollos	250 l/d/1000 pollos
Agroindustrial	Abrevadero	Conejos	300 l/d/1000 conejos
Agroindustrial	Lavado de instalaciones	Lecherías de vacunos	130 l/cabeza/día
Agroindustrial	Lavado de instalaciones	Porquerizas	65 l/cabeza/día

En la figura 4.16 se muestra la curva de variación horaria de demanda para el acueducto de Ciudad de los Niños. La irregularidad de la curva se debe a que el trazado de la misma se realizó en intervalos de medición de 10 min. La curva de consumo fue creada en función del caudal medio horario (2,68 l/s), el cual se representa con un valor de variación igual a 1. La máxima demanda del acueducto se da a las 5:50 a.m., con un factor de variación de 3,27, el cual coincide con la preparación de cada estudiante para ingresar al colegio a las 7:00 a.m., por lo que se espera que las actividades relacionadas sean la preparación de desayunos, así como el uso de baños y servicios sanitarios.

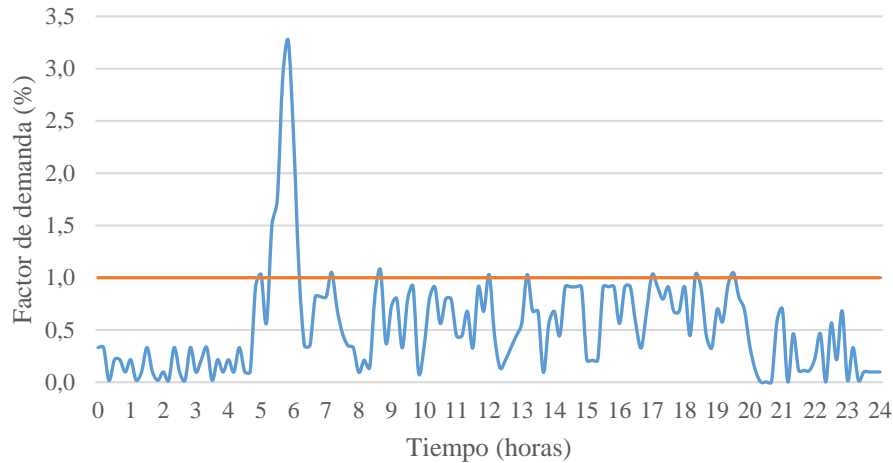


Figura 4.16 Curva de variación horaria de demanda

En ciertos puntos de la curva se presentan demandas mayores al caudal medio diario, los cuales representan periodos significativos de consumo de agua. Generalmente se relacionan con las actividades residenciales como la preparación de alimentos y limpieza. Sin embargo, otros picos importantes en horas de la mañana pueden representar el uso de agua para fines agroindustriales ya que los procesos de ordeño y de limpieza se realizan principalmente en horas de la mañana. El factor de variación mínimo en la curva es de 0,004 y se presenta de manera continua desde las 8:20 p.m. a las 8:40 p.m. y luego a las 10:00 p.m. Lo cual indica que hay una demanda muy baja en esos periodos de tiempo.

#### 4.4.3 Caudales de diseño

En el cuadro 4.6 se especifican los caudales de diseño obtenidos a partir de la estimación de población futura y factores de demanda máxima establecidos en la Norma Técnica para Diseño del AyA (2016). Para el cálculo de caudal máximo diario se utilizó un factor de demanda igual a 1,2 y para el de caudal máximo horario se utilizó un factor igual a 1,80.

Cuadro 4.6 Caudales de diseño

Caudal	Valor (l/s)
Medio diario	6,93
Máximo diario	8,31
Máximo horario	12,47

#### 4.4.4 Estimación de volúmenes

En la figura 4.17 se presenta la curva de masa realizada a partir del análisis de datos obtenidos tras las mediciones de nivel en el TAP. Cada curva está construida a partir del porcentaje de volumen acumulado de los caudales de suministro o de demanda, según corresponda. El porcentaje de volumen acumulado alcanza un valor de 2400 debido a que se consideró que en cada hora debería existir idealmente un porcentaje de suministro igual al 100%. Los espacios entre las curvas indican volúmenes faltantes o excedentes en el tanque de almacenamiento principal. A partir del análisis de datos y mediante la construcción de la curva, se define que los valores porcentuales del volumen máximo faltante (%MF) y del volumen máximo excedente (%ME) son 489,91 y 46,26, respectivamente.

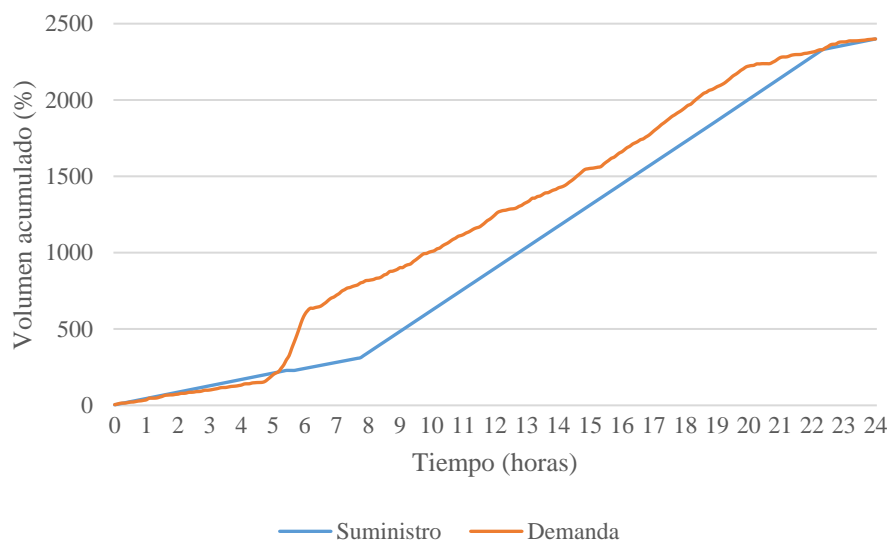


Figura 4.17 Curva de masa del tanque de almacenamiento principal

Para la determinación del volumen de regulación se utilizó la ecuación 3.1 y para el de reserva se utilizó la ecuación 3.2. El Norma Técnica del AyA (2016) establece que la estimación del volumen de reserva para incendios debe realizarse para un periodo mínimo de interrupción del servicio igual a 4 horas. Los volúmenes calculados se presentan en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Volúmenes de reserva y regulación

Volumen	Valor (m <sup>3</sup> )
Regulación	160,44
Reserva por interrupciones	119,69
Reserva por incendios	57 *

\* Valor mínimo establecido por (Bomberos de Costa Rica, 2013)

El manual emitido por Bomberos de Costa Rica (2013) indica que las conexiones de la red de distribución a hidrantes deben ser de un diámetro mínimo de 152,4 mm, debido a que el acueducto es relativamente pequeño y de acuerdo a las condiciones del terreno en CDN, por lo que se espera que la red de distribución cuente con el diámetro mínimo establecido por el Norma Técnica del AyA (2016), que es de 101,6 mm. De este modo se optó por proponer la construcción de un tanque de almacenamiento exclusivo para la atención de emergencias por incendios. La capacidad mínima que debe tener el tanque para incendios está definida por (Bomberos de Costa Rica, 2013).

#### 4.4.5 Ubicación de estructuras

Se realizó respecto a las condiciones existentes de Ciudad de los Niños, buscando el aprovechamiento de algunos de los elementos existentes del acueducto. La determinación de estos lugares se realizó a partir del diagnóstico realizado previamente al sistema de abastecimiento.

##### 4.4.5.1 *Tanque de almacenamiento y regulación (TA)*

El tanque de almacenamiento propuesto para el acueducto de Ciudad de los Niños albergará los volúmenes de regulación y de reserva en caso de reparaciones. En el sitio de mayor accesibilidad y altitud se encuentra el tanque de almacenamiento secundario, que cuenta con una elevación de 1365,77 m.

En una de las visitas al acueducto se observó que las condiciones del terreno en los alrededores del TAS no presentan signos de erosión o deslizamientos, lo que reduce el riesgo de construcción del tanque principal en el sitio. El cálculo hidráulico a las tuberías de salida del TAS, indica que la presión en los puntos de consumo de mayor altitud es mayor a 20 mca,

demostrando que la altitud en la que se ubica permite brindar una buena presión de servicio en los puntos de consumo críticos. Mediante el análisis del mapa de riesgos se descarta la posibilidad de que el tanque de almacenamiento propuesto sufra daños de manera directa mediante la activación de fallas sísmicas inundaciones. En la figura A.1.5, apéndice 1, se muestra el sitio recomendado para la construcción del tanque de almacenamiento.

Las dimensiones del tanque de almacenamiento se determinaron a partir de las Normas de Diseño (EPM, 2009), las cuales indican que los niveles del tanque deben ser suficientes para propiciar presiones de servicio, que cumplan con la normativa correspondiente, en los puntos de consumo. Así mismo establece que la diferencia de nivel entre el fondo del tanque y la tubería de salida debe ser de al menos 0,1 m y que se debe respetar un borde libre de 0,30 m para evitar presiones sobre la tapa del tanque. Se determinó que el área del tanque debe ser igual a 104 m<sup>2</sup> y la altura total, no debe ser mayor a 3,50 metros. La elección de niveles del tanque se presenta en el cuadro 4.8.

Cuadro 4.8 Niveles del tanque de almacenamiento

Secciones	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Base	0,10	10,40
Reserva	1,44	149,61
Regulación	1,93	200,54
Borde libre	0,30	31,20

#### 4.4.5.2 *Tanque de unión (TU)*

Se propone la construcción de un tanque de reunión de caudales de suministro de agua. La construcción de este tanque permite el control de caudal de entrada al tanque de almacenamiento, que es el encargado de regular el suministro de agua a los consumidores. Así mismo, funciona como un tipo de pretratamiento que permite la mezcla adecuada del agua y en caso de que el agua suministrada por el pozo o la red municipal cuente con sedimentos, estos puedan ser depositados en el tanque de unión y evitar el ingreso de los mismo al tanque de almacenamiento. Contar con un tanque de reunión previo al tanque de distribución, permite determinar irregularidades en la matriz del agua y controlarlas en el

sitio antes de que el agua insegura llegue al tanque de distribución, representando un riesgo para los consumidores.

El tanque de unión se dimensionó conforme a lo establecido por las Normas de Diseño (EPM, 2009), la distribución de niveles se puede ver en el cuadro 4.9. y tomando en cuenta las dimensiones del tanque de almacenamiento principal actual de CDN. Buscando la reducción de costos para la construcción del acueducto se consideró la utilización de uno de los tanques de almacenamiento principal, tras la realización de obras de remodelación y mejoramiento, así como aumentar en un metro la elevación del mismo, para garantizar presiones adecuadas y que cumplan con normativa.

Cuadro 4.9 Niveles del tanque de reunión

Nivel	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Base	0,10	5,68
Máximo	1,60	90,92
Borde libre	0,30	17,05

#### 4.4.5.3 *Tanque para incendios (TR)*

La decisión de implementar en la propuesta un tanque de reserva únicamente para la atención de incendios, fue motivada para buscar una reducción de costos en la construcción de la red de distribución y para mantener una adecuada eficiencia del sistema. (Bomberos de Costa Rica, 2013) exige que la conexión del hidrante debe hacerse a una tubería de 152,4 mm, valor que supera el diámetro máximo propuesto para tuberías en redes de distribución del acueducto de Ciudad de los Niños. Implementar tuberías de 152,4 mm a la red de distribución implicaría un funcionamiento inadecuado de la red, aumentando en gran proporción las presiones en los puntos de consumo y disminuyendo a casi a cero la velocidad en las tuberías.

Es importante mencionar que el hidrante debe ser conectado a una tubería de presión para evitar daños en la misma, en caso de que se conecte la bomba para incendios con la que cuentan los cuerpos de bomberos. El aumento del diámetro y la implementación de tuberías que resistan presiones aumentarán los costos de materia prima y reducirá la eficiencia del sistema para servir agua con valores de presión y velocidad aceptables.

Se consideró utilizar dos de los tanques que conforman el tanque de almacenamiento principal de CDN, para la reserva de incendios. Es posible que para el uso de este tanque se requiera de un gran trabajo en términos de remodelación y mejoras implementadas para lograr que sea adecuado para su uso, además de aumentar la elevación del mismo en un metro, para garantizar el cumplimiento de presión. El área del tanque será de 42 m<sup>2</sup> y los niveles propuestos para el tanque de reserva se establecen en el cuadro 4.10.

Cuadro 4.10 Niveles del tanque de reserva

Nivel	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Base	0,10	4,20
Máximo	1,60	67,20
Borde libre	0,3	12,60

#### 4.4.5.4 Fuentes de captación de agua

Para el modelamiento se utilizaron dos de las fuentes de captación con las que cuenta Ciudad de los Niños, el pozo principal (PP) y la conexión con la tubería municipal (CTM). Se tomaron en cuenta las características actuales de dichas fuentes, ya que no se cuenta con acceso a estudios hidrogeológicos para conocer la disponibilidad de agua futura de las mismas o de proyecciones de perforación para la implementación de nuevas fuentes.

##### 4.4.5.4.1 Obtención de curvas de funcionamiento de bombeo

La elección de una bomba debe realizarse en función de las necesidades del sistema. La curva del sistema en la figura 4.18, permite conocer la presión de trabajo que debería tener la bomba para impulsar el caudal deseado desde el pozo principal hasta el tanque de almacenamiento principal. El caudal de trabajo de la bomba será de 2,76 l/s, asumiendo que el suministro es constante y que el pozo tendrá la misma disponibilidad de agua en los próximos 20 años. La curva del sistema indica que para que la bomba sea capaz de impulsar el agua hasta el tanque de almacenamiento principal deberá contar con una presión de trabajo igual a 51,70 mca. Según (Franklin Electric, 2017), la bomba deberá tener una potencia de 5 HP y contar con un diámetro de tubería de succión de 101,6 mm y una de impulsión igual a 50,8 mm.



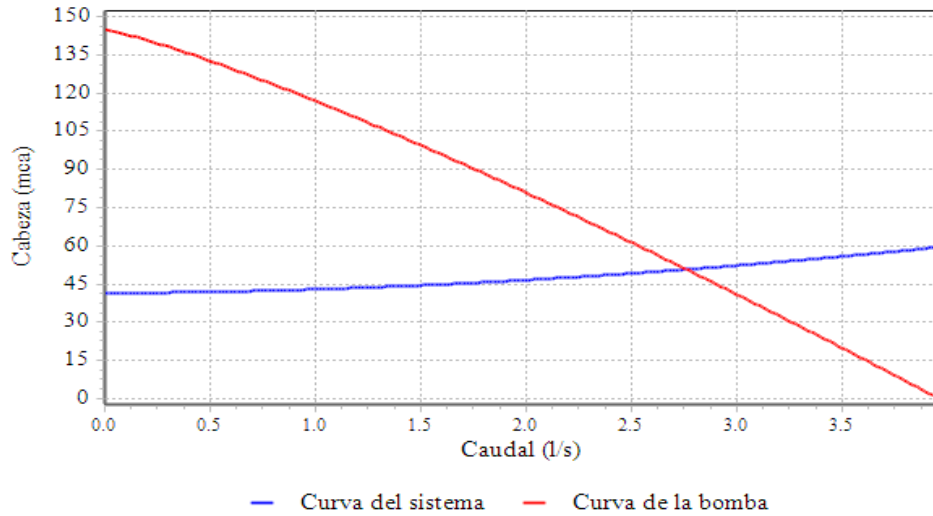


Figura 4.18 Curva del sistema y de la bomba requerida para el pozo principal

La curva del sistema en la figura 4.19, representa las necesidades requeridas para poder trasladar el caudal deseado desde el tanque de unión al tanque de almacenamiento principal. Se determinó un caudal de trabajo de la bomba igual a 3,19 l/s, el cual debe impulsarse con una presión de 25,19 mca para vencer la diferencia de elevación entre tanques y las pérdidas de la tubería. El caudal de bombeo se eligió en función del nivel de agua del tanque de unión debido a que, si la bomba succiona un caudal mayor, el tanque se vacía y la bomba sufre varios periodos de encendido y apagado en menos de una hora, lo que puede generar daños a la misma. Según (Franklin Electric, 2017), la bomba deberá tener una potencia de 2 HP y contar con un diámetro de tubería de succión de 101,6 mm y de impulsión igual a 50,8 mm.

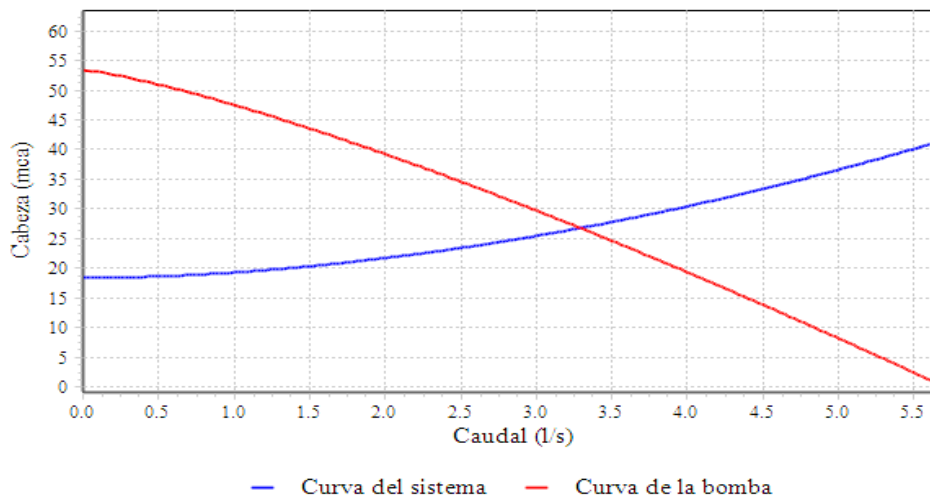


Figura 4.19 Curva del sistema y de la bomba requerida para abastecer al tanque de almacenamiento

#### 4.5 TRAZADO DE TUBERÍAS

El trazado de tuberías se basó en las condiciones de distribución de edificios, de la topografía del terreno y, respecto a lo establecido por la Norma Técnica del AyA (2016). La configuración de la red de distribución se realizó conforme a lo establecido por (CONAGUA, s.f.), donde se indica que las redes de distribución de configuración cerrada son más apropiadas debido a que se da una mejor distribución del agua, evita la sedimentación y posibilita el uso del agua en momentos de reparación en alguno de los puntos en la red de distribución. Sin embargo, debido a la distribución de edificios en CDN, se optó por una configuración de tipo mixta, lo cual se puede observar en la figura 4.20.

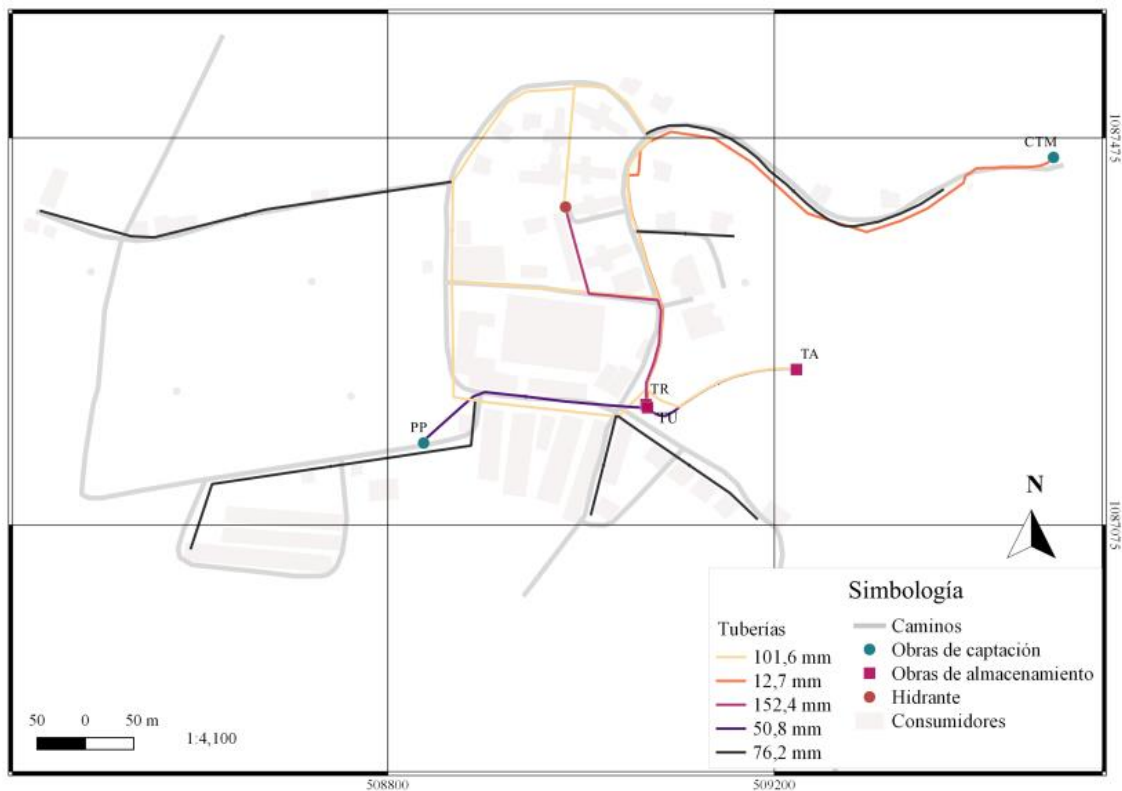


Figura 4.20 Mapa de la distribución de estructuras para la propuesta de diseño

Dos de los tres tramos de aducción con los que cuenta la propuesta corresponden a tramos actuales del acueducto de Ciudad de los Niños, lo que representa un ahorro en cuanto a la compra de materia prima para la construcción del acueducto. Las tuberías que conducen el agua desde el pozo principal y el acueducto municipal al tanque de unión no necesitan reemplazo y pueden ser utilizadas para el acueducto propuesto.

En la figura 4.21 se presenta un esquema del sistema de abastecimiento propuesto. Donde se expone la secuencia que tendrá el flujo del agua dentro del acueducto, el agua proveniente de las fuentes de captación son llevadas al tanque de unión que se encargará de distribuir el agua al tanque de almacenamiento y al tanque de reserva para atención de incendios. El tanque para la atención de incendios abastecerá únicamente al hidrante (H), mientras que el tanque de almacenamiento se encargará de regular la distribución de agua a toda la red de distribución.

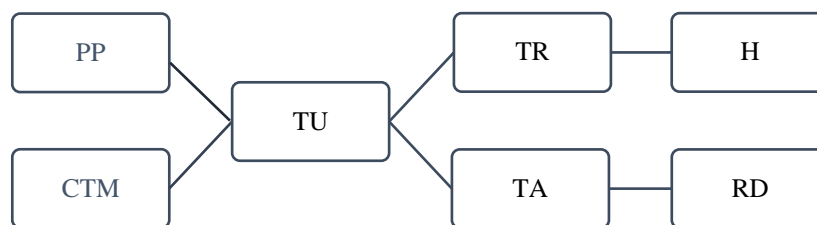


Figura 4.21 Esquema del sistema de abastecimiento propuesto

#### 4.6 ESCENARIOS DE MODELACIÓN DEL ACUEDUCTO

Se desarrollaron tres escenarios mediante el método de modelación en periodo extendido para visualizar el funcionamiento del acueducto en condiciones normales, condiciones de arranque y de atención a incendios.

La prueba de nivel realizada en los tanques de almacenamiento permitió obtener datos necesarios para elaborar una curva de niveles en el tanque de almacenamiento para las 48 horas de medición como se muestra en la figura 4.22. Como se puede observar, la curva posee un comportamiento similar cada 24 horas. Así mismo, según Aguilar (2017) las actividades administrativas, educativas, agropecuarias y de alojamiento realizadas en Ciudad de los Niños, generalmente son las mismas durante todos los días de la semana, por lo que se esperaría que la variación de demanda entre un martes y un miércoles, por ejemplo, no sea tan significativa. Debido a lo anterior se asume que el comportamiento del acueducto no presentará variaciones significativas de consumo entre periodos de 24 horas, durante cinco días hábiles. Lo anterior permitirá observar de manera aproximada el funcionamiento de algunos elementos importantes del modelo.

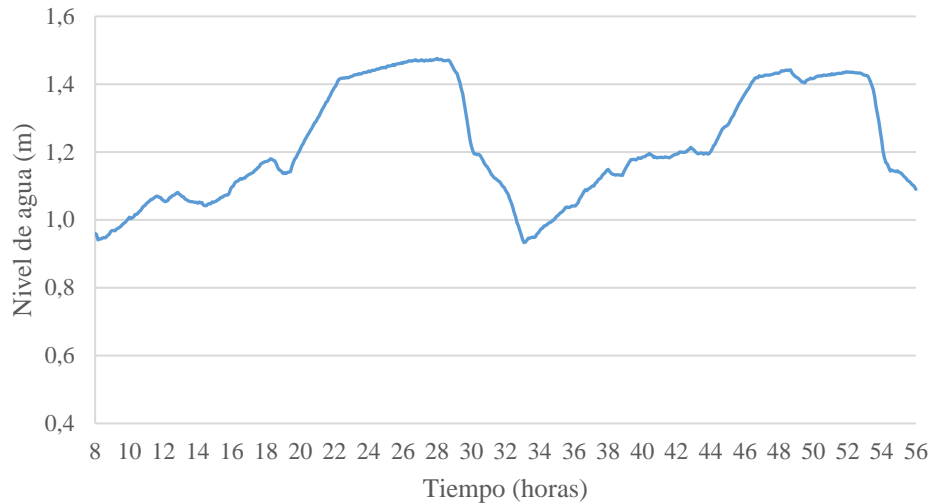


Figura 4.22 Niveles de agua del tanque de almacenamiento principal para 48 de medición

#### 4.6.1 Funcionamiento normal

Este escenario representa el comportamiento habitual del sistema de abastecimiento propuesto, sin estar sometido a condiciones de emergencia, escasez, arranque u otra situación atípica.

##### 4.6.1.1 Cumplimiento del modelo

Para verificar el cumplimiento del diseño del sistema de abastecimiento propuesto conforme a lo establecido por la Norma Técnica del AyA (2016), se extrajo del modelo los resultados obtenidos para el minuto 350 (5:50 a.m.), que corresponde al momento de mayor demanda registrado en CDN y observado en la curva de variación horaria de la demanda. En la figura 4.23 se muestra un mapa que representa el cumplimiento o incumplimiento, de cada uno de los nodos y tramos de tubería establecidos en el modelo. Únicamente el nodo ASA cuenta con incumplimiento de presión para un valor de 11.73 mca, lo cual se debe a que la presión resultante en el nodo BM no es capaz de vencer de la manera esperada la diferencia de nivel. Sin embargo, no deja de ser una presión adecuada para la realización eficiente de las actividades en el Albergue San Alonso. Por su parte, se muestra únicamente cumplimiento de velocidad en los tramos TA-SD, SD-BM y SD-CF. Cada nodo tiene asignada una sigla, la cual corresponde al nombre del edificio existente más cercano al nodo, ver cuadro 4.11.



Figura 4.23 Mapa de cumplimiento de velocidad en tuberías y presión en nodos del modelo

Cuadro 4.11 Nombre de nodos en estudio conforme al edificio más cercano

Nodo	Nombre edificio
AST	Albergue Santo Tomás
PLL	Pollera
ALG	Albergue La Gloria
ASAG	Albergue San Agustín
ASE	Albergue San Ezequiel
ACP	Albergue Cipreses
ALA	Albergue Los Ángeles
CF	Casa Frailes
ADM	Administración
GIM	Gimnasio
ASA	Albergue San Alonso
AM	Albergue Miami
BM	Bodegas de mantenimiento
TLE	Taller de Electrotecnia
CM	Comedor
CC	Corral de Cerdos
SD	Soda

La figura 4.24 muestra los valores de presión obtenidos, de manera resumida, para el momento de mayor demanda presentado en el acueducto. La curva muestra que el 6% de los nodos o menos, cuentan con una presión menor a 15 mca, que corresponde al mínimo establecido en la Norma Técnica del AyA (2016), mientras que el 94% de los nodos poseen valores de presión dentro del rango de cumplimiento establecido. En el cuadro A.4.2, apéndice 4, se presenta con mayor detalle los resultados obtenidos en los nodos incluidos en el modelo.

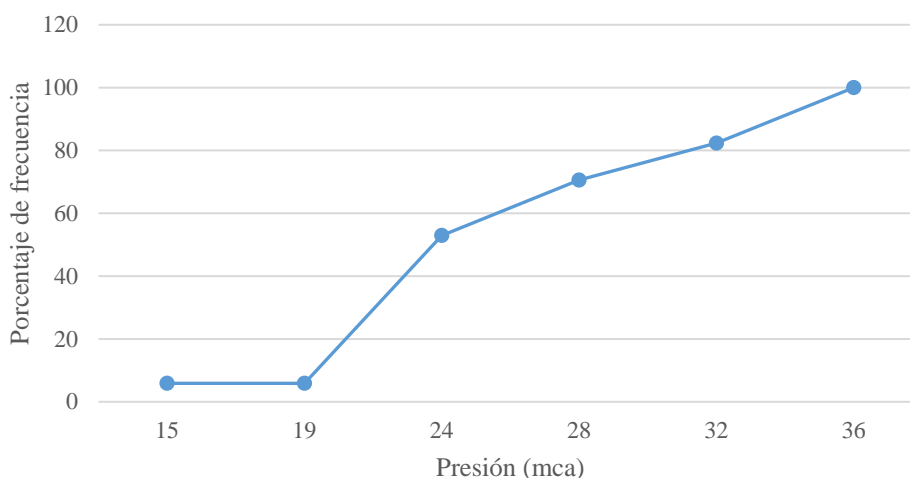


Figura 4.24 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las presiones obtenidas mediante la modelación realizada en WaterGEMS

La figura 4.25 muestra los valores de velocidad obtenidos, de manera resumida, para el momento de mayor demanda registrado en el acueducto. La curva muestra que el 96% de los tramos de tubería incluidos o menos, cuentan con una velocidad menor a 0,5 m/s, que corresponde al mínimo establecido en la Norma Técnica del AyA (2016), mientras que el 100% o menos de los tramos de tubería poseen velocidades menores a 1 m/s, lo cual indica que únicamente el 4% de los tramos establecidos se encuentran dentro del rango de cumplimiento establecido. La Norma Técnica del AyA (2016) establece que, deben mantenerse los diámetros de tubería normados aun cuando se presente incumplimiento de velocidad. En el cuadro A.4.1, apéndice 4, se presenta con mayor detalle los resultados obtenidos en los tramos incluidos en el modelo.

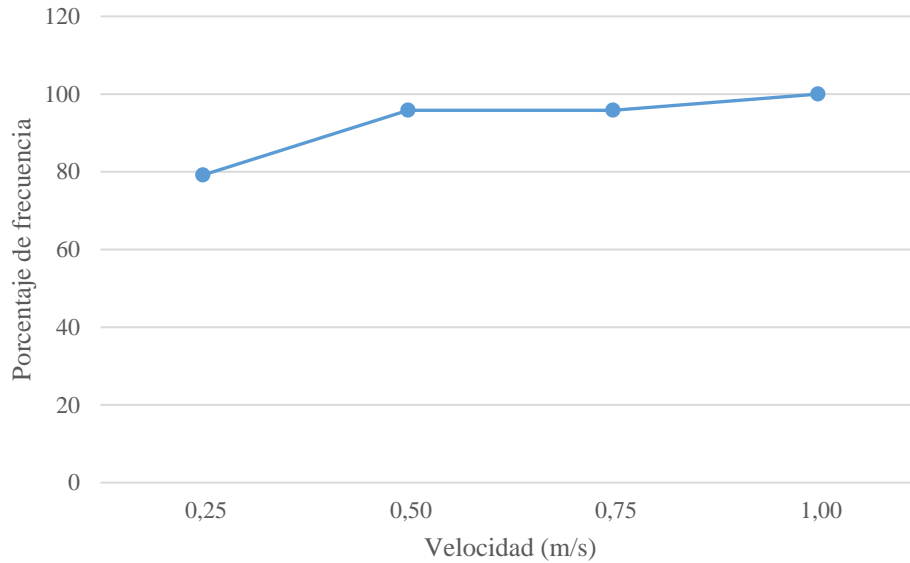


Figura 4.25 Gráfico de frecuencias acumuladas relativas de las velocidades obtenidas mediante la modelación realizada en WaterGEMS

#### 4.6.1.2 *Fuentes de abastecimiento*

Los datos brindados por (Urbina, 2017) se utilizaron para la creación de un patrón de presión, con el fin de representar la variación de suministro del AMC y así, representar el comportamiento del tramo de tubería que une al acueducto municipal con el tanque de almacenamiento principal de Ciudad de los Niños. En la figura 4.26 se presenta un corte del servicio entre las 5:30 a.m. y 5:50 p.m., mientras que en los periodos de servicio se obtiene un caudal de suministro que fluctúa entre 0,47 l/s y 0,48 l/s. Durante un periodo de un día el acueducto municipal ofrece al acueducto de CDN 19,74 m<sup>3</sup>, aproximadamente.

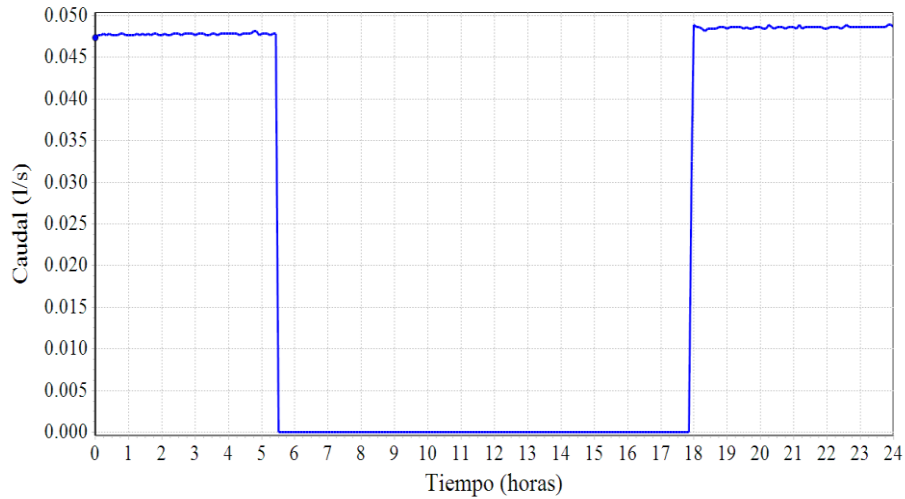


Figura 4.26 Caudal de suministro ofrecido por el acueducto municipal

En la figura 4.27 se presenta el funcionamiento de la bomba del pozo principal para un periodo de 5 días, ya que los periodos de funcionamiento de la misma son mayores a 24 horas. Debido a los requerimientos de demanda del acueducto, la bomba debe permanecer encendida durante 32,27 horas, con periodos de descanso de 22,72 horas. Por razones económicas y operativas (OPS, CEPIS, & OMS, 2005) recomienda que los tiempos de bombeo no deben superar las 8 horas de funcionamiento continuo y en casos especiales, no deberá ser mayor a 12 horas, sin embargo, el periodo de funcionamiento de esta bomba es 3,1 veces mayor, lo que puede traducirse en un menor periodo de vida de la misma. De contar con un suministro mayor por parte del pozo principal o un mayor número de ellos, los periodos de tiempo de la bomba pueden disminuir significativamente.



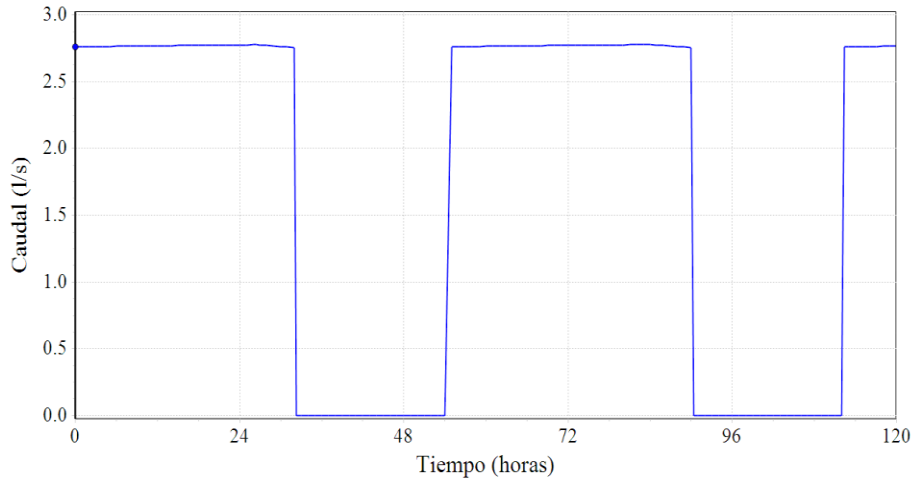


Figura 4.27 Caudal suministrado por el pozo principal y periodos de bombeo

En la figura 4.28 se puede observar que los tiempos de bombeo para el transporte de agua desde el tanque de unión al tanque de almacenamiento principal, son mayores a 24 horas, por lo que la simulación de funcionamiento se realiza para un periodo de 5 días. La bomba cumple tiempos de bombeo de alrededor de 26,48 horas y con periodos de inactividad de 27,12 horas. Al igual que la bomba del pozo principal, cumple con periodos de funcionamiento mucho mayores al máximo recomendado. Se evidencia, además, que el caudal de suministro disminuye conforme aumenta el tiempo de bombeo, alcanzando un valor mínimo de 3,14 l/s.

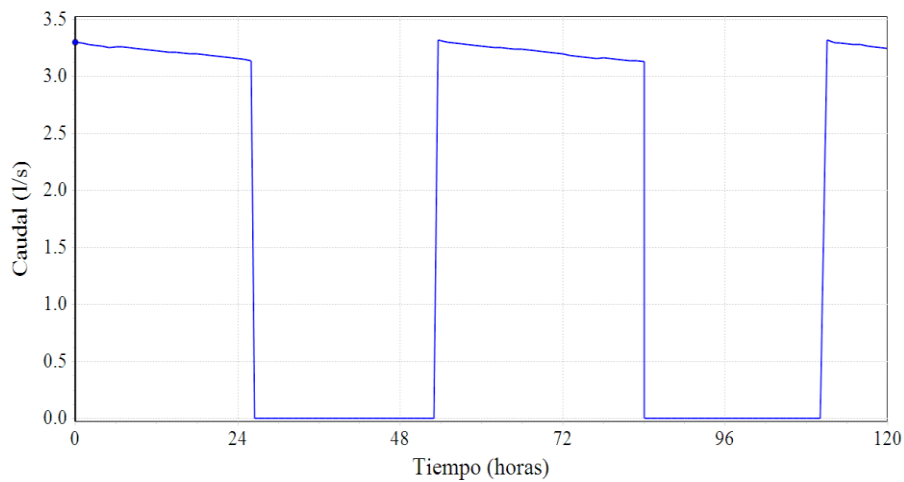


Figura 4.28 Caudal suministrado por la bomba que abastece al tanque de almacenamiento y sus periodos de bombeo

#### 4.6.1.3 *Tanque de almacenamiento*

En la figura 4.29 se muestran las variaciones de nivel en el tanque de almacenamiento principal. Los controles operacionales asignados al tanque permiten que únicamente se trabaje con el volumen de regulación, por lo cual se evidencia que el nivel de agua por lo general no desciende de 1,35 m. El llenado del tanque tarda 26,48 horas, lo que coincide con el periodo de funcionamiento de la bomba que lo abastece. Los procesos de llenado en este tanque dependen de los controles asignados a la bomba que lo abastece. El control se realiza mediante sensores de nivel en el tanque, los cuales le indican a la bomba que debe encenderse cuando el nivel de agua es menor o igual a 1,35 m y, cuando es mayor o igual a 3,02 m, que se apague.

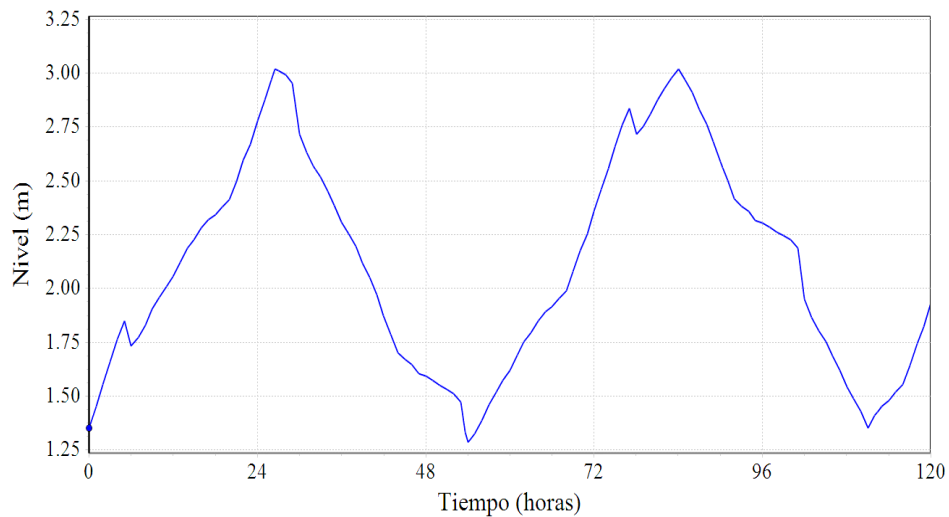


Figura 4.29 Variación de nivel de agua en el tanque de almacenamiento

La figura 4.30 muestra las variaciones de caudal en el tanque de almacenamiento respecto al flujo de entrada. Cuando la curva se mantiene por encima de cero indica que el tanque se encuentra en proceso de llenado, lo que implica que la demanda del acueducto es menor al caudal de entrada. A las 5:15 a.m. comienza un proceso de descarga del tanque de almacenamiento debido a que, como se muestra en la curva de variación de demanda (figura 4.16), comienza a presentarse el mayor requerimiento de agua en la institución. A las 6:10 am, comienza a darse nuevamente el proceso de llenado del tanque de almacenamiento. El proceso de llenado indica que la demanda del sistema es menor al flujo de entrada en el

tanque de almacenamiento. Una vez la bomba entre en periodo de descanso, la curva se mantendrá la gran parte del tiempo por debajo de cero, indicando que el tanque de almacenamiento se encuentra en un periodo de descarga.

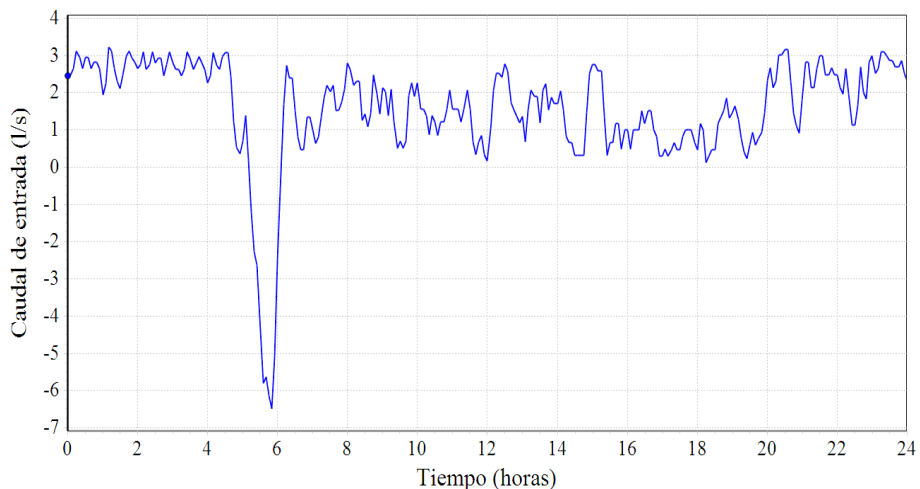


Figura 4.30 Variación de caudal en el tanque de almacenamiento

#### 4.6.1.4 *Tanque de unión y tanque de reserva para incendios*

En la figura 4.31 se muestra la variación de nivel del tanque de unión, así como la variación de caudales en el mismo. Al analizarlos en conjunto, es posible observar que cuando se presenta una disminución del nivel de agua en el tanque es porque se está generando un consumo. El caudal de salida depende de la succión de la bomba que alimenta al tanque de almacenamiento principal, por lo que las primeras 26 horas la curva de caudal muestra un comportamiento prácticamente constante. Tras apagarse la bomba, el caudal de salida del tanque es cero y comienza el proceso de llenado. A las 53,60 horas se presenta una importante salida de caudal, ya que en ese momento la bomba del pozo principal se mantiene apagada y la del tanque de almacenamiento se enciende. El menor valor de nivel alcanzado es de 0,50 m.

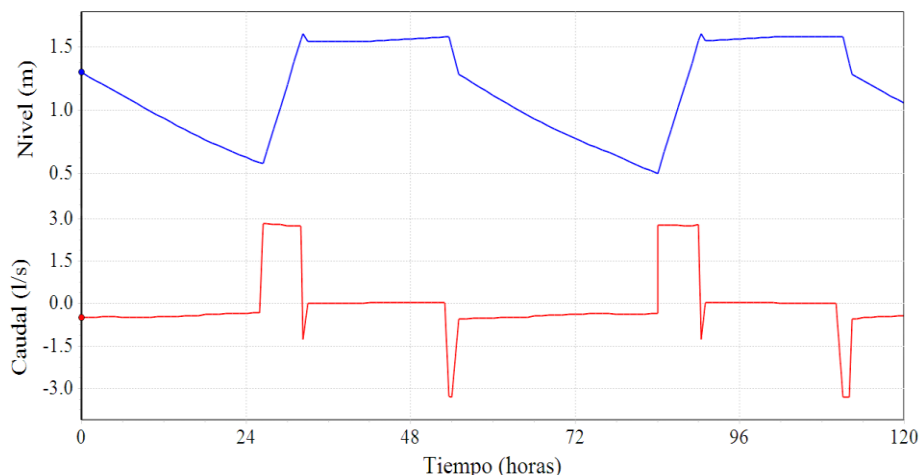


Figura 4.31 Variación de caudal y de niveles de agua en el tanque de reunión

El llenado del tanque de unión depende en gran parte de los controles asignados a la bomba del pozo. El control se realiza mediante sensores de nivel en el tanque, los cuales le indican a la bomba que cuando el nivel de agua es menor o igual a 1,30 m que se encienda y, cuando es mayor o igual a 1,60 m, que se apague. La elección de los controles se hizo en función de la máxima capacidad del tanque y procurando que el nivel de agua en el tanque fuera de al menos una tercera parte de la capacidad total.

Durante el funcionamiento normal del acueducto el tanque de reserva para incendios permanece lleno, a la espera de ser usado en caso de emergencias.

#### 4.6.1.5 Red de distribución

La figura 4.32 muestra la variación de presión de servicio en el nodo ASA y el nodo CM, que representan los nodos con menor y mayor presión, respectivamente. La presión en el nodo ASA fluctúa entre 11,73 mca y 15,17 mca. El valor mínimo alcanzado sucede a las 5:36 a.m. del tercer día que corresponde al momento de mayor demanda en CDN. Alcanza un valor de presión mayor a 15 mca únicamente durante un pequeño periodo en horas de la madrugada durante el segundo día. Por lo que en términos generales en este nodo no se alcanza el valor mínimo establecido para presión por el AyA (2016). Por su parte, el nodo CM cuenta con presiones que fluctúan entre 34,34 mca y 38,00 mca, por lo que cumple con el rango permisible establecido en la Norma para diseño del AyA (2016).

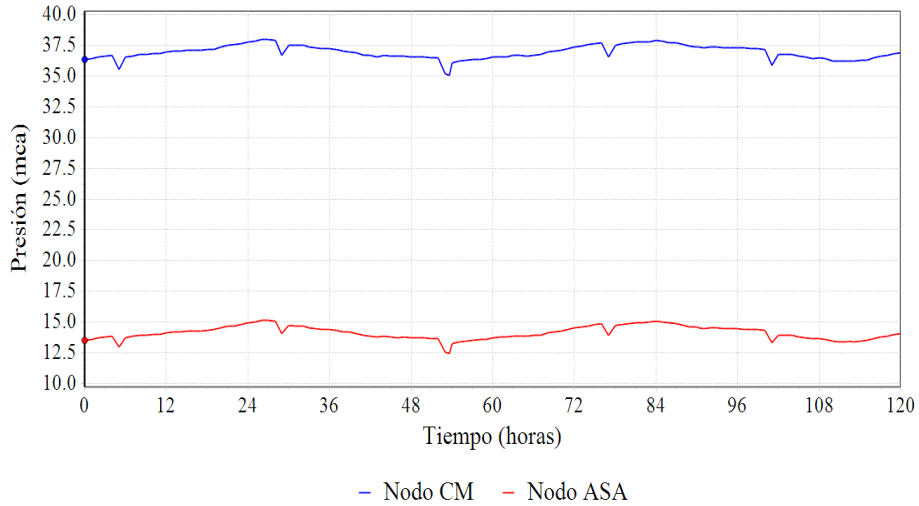


Figura 4.32 Variación de presión en los nodos con valores mínimos y máximos alcanzados

Las tuberías que presentan los valores mínimos y máximos de velocidad son TLE-AM y SD-CF, respectivamente. En la figura 4.33 se observa la variación de velocidad en las tuberías seleccionadas para análisis para un periodo de 24 horas. La tubería TLE-AM cuenta con los valores más bajos de velocidad en la red, siendo su valor máximo 0,024 m/s y el mínimo 0,001 m/s. La tubería SD-CF cuenta con valores de velocidad menores a 0,6 m/s con una velocidad máxima de 0,419 m/s y mínima de 0,023 m/s. Por lo tanto, ninguna de las tuberías de la red de distribución cumple con lo establecido en el Norma Técnica del AyA (2016). Debido a esto, existe la posibilidad de que ocurra sedimentación en ciertos puntos de la tubería.

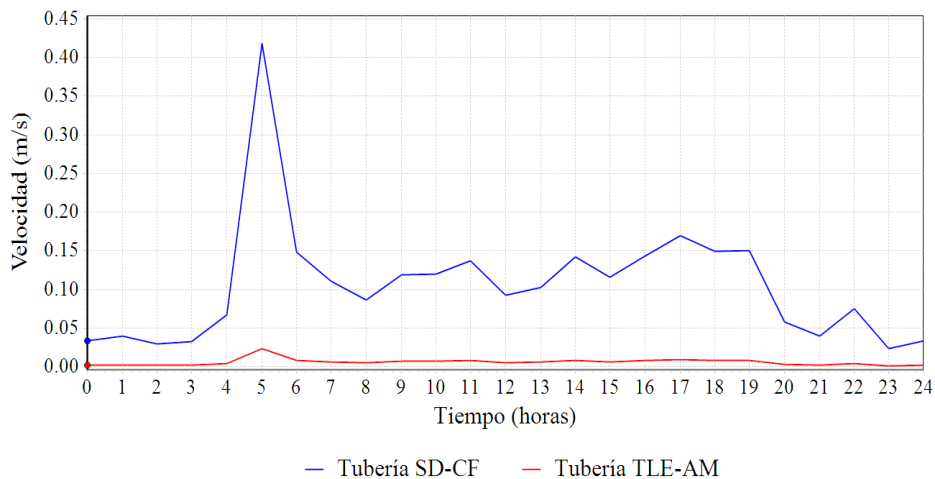


Figura 4.33 Variación de velocidad en las tuberías con valores mínimos y máximos alcanzados

Las variaciones en la velocidad de las tuberías de aducción se presentan en la figura 4.34. Las tuberías que inician en el pozo y finaliza en el tanque de unión (PZ-TU) y la que se encuentra entre el tanque de unión y el tanque de almacenamiento (TU-TA) presentan velocidades bastante constantes, debido a que su suministro está regido por el funcionamiento de una bomba que impulsa agua de manera constante. CTM-TU corresponde a la tubería procedente del acueducto municipal y debido a los periodos de corte, la velocidad en esos periodos es igual a 0 m/s; la mayor velocidad que alcanza es de 0,38 m/s. Tanto la tubería PZ-TU como TU-TA, cumplen con el rango de velocidad establecido por el Norma Técnica del AyA (2016), mientras que la tubería CTM-TU, no alcanza el valor de velocidad mínimo establecido.

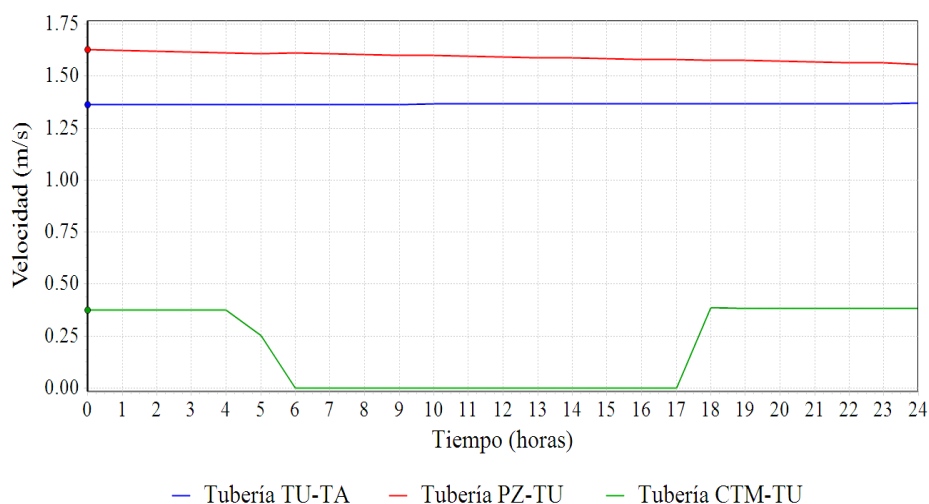


Figura 4.34 Variación de velocidad en las tuberías que cuentan con valores mínimos y máximos alcanzados en el escenario de arranque

#### 4.6.2 Escenarios de arranque del sistema

Se establecieron escenarios para conocer el tiempo en que el acueducto logra estabilizarse. El primero de ellos se simuló partiendo del hecho de que el arranque del acueducto se realiza durante tiempo lectivo en CDN y el segundo fuera de tiempo lectivo. Las simulaciones de arranque inician a las 0:00 a.m., con los tanques de reserva y de unión vacíos.

La simulación de arranque durante tiempo lectivo provoca cortes de servicio en la primera hora, posteriormente el sistema puede suplir las necesidades del sistema, sin embargo, en ese momento aún no se ha estabilizado, ver figura 4.35. La estabilización del sistema se produce posterior a las 11:58 a.m. del cuarto día, momento el tanque de unión se encuentra vacío, posteriormente comienza un proceso de llenado para mantener un nivel mínimo en el tanque de 0,50 m.

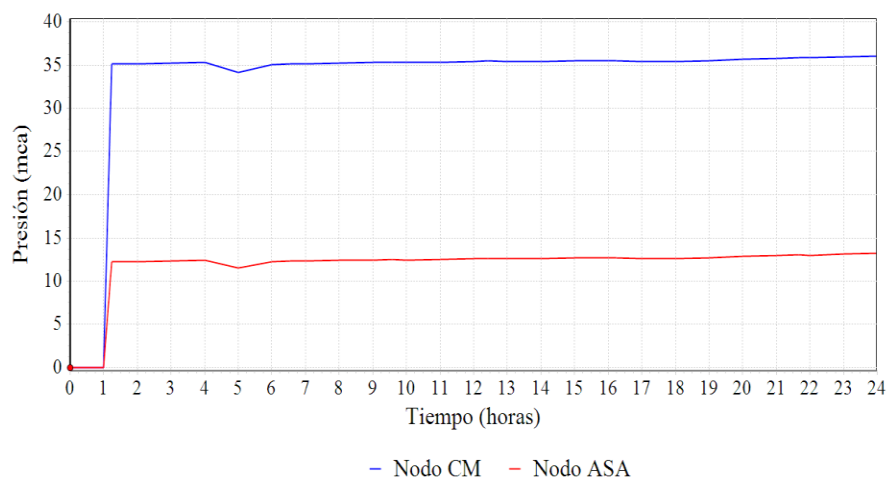


Figura 4.35 Variación de presión en los nodos que cuentan con valores mínimos y máximos alcanzados en el escenario de arranque

El tanque de almacenamiento alcanza su máxima capacidad a las 10:23 p.m. del segundo día, mientras que el tanque de reserva para incendios a las 12:00 p.m. del cuarto día. Por lo que, en términos generales, el sistema puede tener un funcionamiento normal tras 84 horas desde el inicio de arranque del acueducto. En la figura 4.36 se muestra el comportamiento de nivel dentro de los tanques propuestos para el acueducto de Ciudad de los Niños.

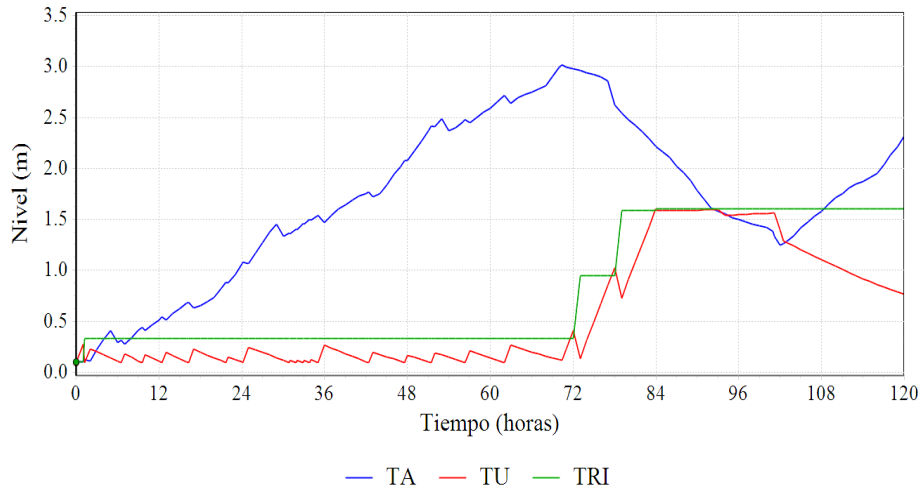


Figura 4.36 Variación de nivel en los tanques durante el arranque del sistema en tiempo lectivo

La simulación de arranque fuera de tiempo lectivo constituye un periodo de inestabilidad menor al presentado en el escenario de arranque durante periodo lectivo. El último momento en que un tanque se encontró vacío fue a la 1:10 a.m. durante el segundo día, a partir de ese punto el tanque de unión comienza el proceso de llenado, ver figura 4.37. En esta simulación se asumió que, al estar fuera de tiempo lectivo, el consumo en CDN iba a ser muy bajo, por lo cual el sistema se estabiliza mucho más rápido.

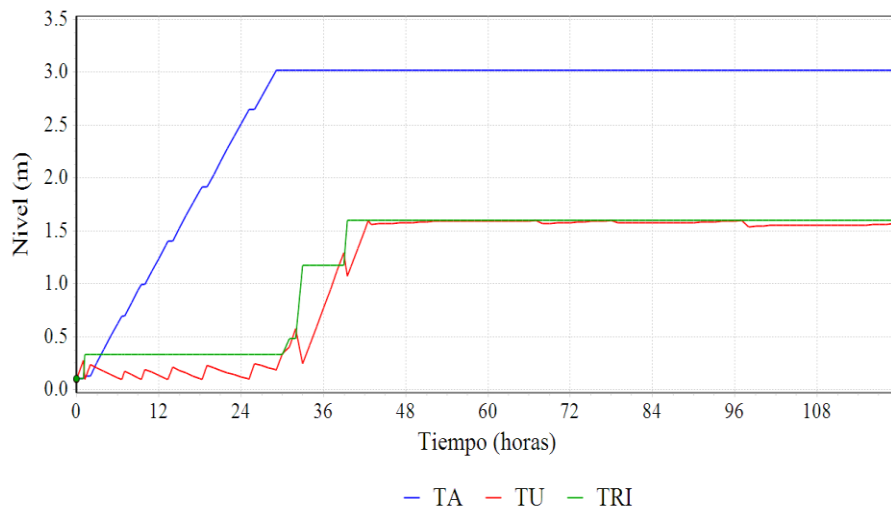


Figura 4.37 Variación de nivel en los tanques durante el arranque del sistema en tiempo no lectivo



### 4.6.3 Escenarios para emergencias

Se establecieron cuatro periodos de tiempo en los que el acueducto puede presentar emergencias por incendios los cuales son durante la madrugada, mañana, medio día y noche. El fin de estas simulaciones es evaluar la capacidad del sistema para afrontar situaciones de emergencia. El hidrante fue configurado a partir de las especificaciones brindadas por (Bomberos de Costa Rica, 2013), el caudal de servicio en el hidrante será 8,50 l/s y se mantendrá durante una hora para el control de incendios, la tubería del tanque de reserva para incendios al hidrante tiene una longitud de 276 m, es de hierro y cuenta con un diámetro de 152,4 mm.

La figura 4.38 representa el comportamiento del tanque de reserva tras una simulación de apagado de incendio entre la 1:00 a.m. y 2:00 a.m., se puede observar una disminución abrupta del nivel del agua en el tanque de reserva para incendios a la 1:00 a.m., debido a la demanda del sistema, el tanque de reserva tarda aproximadamente 35 horas en reestablecer su nivel máximo de agua. El tanque de reserva y el de unión se encuentran a la misma altura, por lo que el llenado del TR se realiza conforme al del TU. Cuando hay una disminución de nivel de agua en el tanque de reserva, el tanque de unión comienza a distribuirle de su volumen, debido a esto, la bomba del pozo que controla el llenado del TU, extiende su periodo de funcionamiento en 3,06 horas.

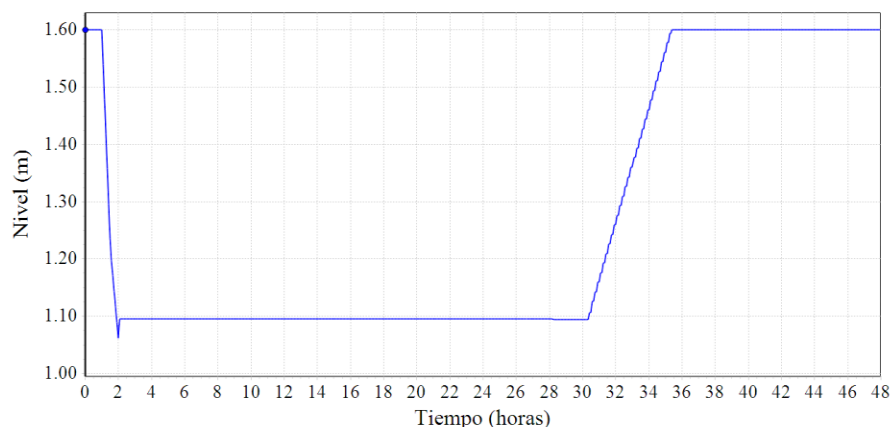


Figura 4.38 Niveles de agua en el TR en la modelación de la atención de incendio en la madrugada

El comportamiento de nivel en el tanque de almacenamiento para una atención de incendio en horas de la noche, específicamente entre las 7:00 p.m. y las 8:00 p.m., se presenta en la

figura 4.39. El tanque de reserva tarda 16,37 horas en reestablecer nivel máximo de agua. Al comparar la figura 4.39 con la 4.38, se puede observar que el tanque se llena tras un episodio de atención a incendio, sin importar la hora en que se produzca la emergencia, a las 11:22 a.m. del día posterior al incendio. Lo anterior se debe a que la etapa de recuperación de volumen en el tanque de reserva se da generalmente en la madrugada, cuando la demanda es baja. Es por eso que los tiempos de recuperación varían dependiendo del momento en que se produzca el incendio, así si el incendio se produce en horas de la madrugada, el tiempo de recuperación del máximo nivel en el tanque será mayor que si el incendio se produce en la noche. Razón por la que sólo incluirán las simulaciones realizadas para las primeras y las últimas horas del día.

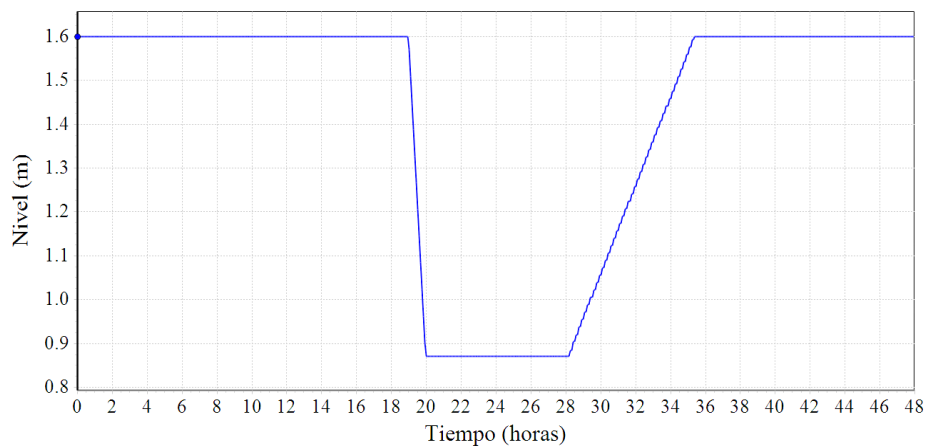


Figura 4.39 Niveles de agua en el TR durante la modelación en la atención de incendio en la noche

En la figura 4.40 se observa que el hidrante comienza a demandar 8,50 l/s a la 1:00 a.m. y el nivel de agua rápidamente disminuye a 1,06 m, en ese punto el tanque de unión cuenta con un nivel de agua igual 1,30 m, por lo que empieza abastecer al tanque de reserva, compensando el volumen consumido por el hidrante. Mientras que, durante la simulación de incendio en horas de la noche, el nivel del agua disminuye hasta 0,87 m y se mantiene constante hasta las después de las 28 horas, lo que indica que al momento del incendio el tanque principal contaba con un nivel de agua menor a 0,87 m.

La figura 4.40 indica que la presión de servicio disponible en el hidrante es igual a 15,23 mca, sin embargo, cuando el nivel del tanque de reserva desciende a 0,87 m, la presión puede disminuir a 14,21 mca y aumenta conforme el tanque aumente su nivel de agua en el proceso

de llenado. La velocidad de salida del hidrante es de 0,47 m/s y se mantiene constante durante todo el periodo de uso del hidrante. Según (Bomberos de Costa Rica, n.d.) cada hidrante debe brindar una presión mínima para atención de emergencias de 1,41 kg/cm<sup>2</sup>, valor que equivale a 14,1 mca. Se obtuvo como resultado que la presión de salida del hidrante para la atención de incendios es mayor que la mínima establecida por Bomberos de Costa Rica.

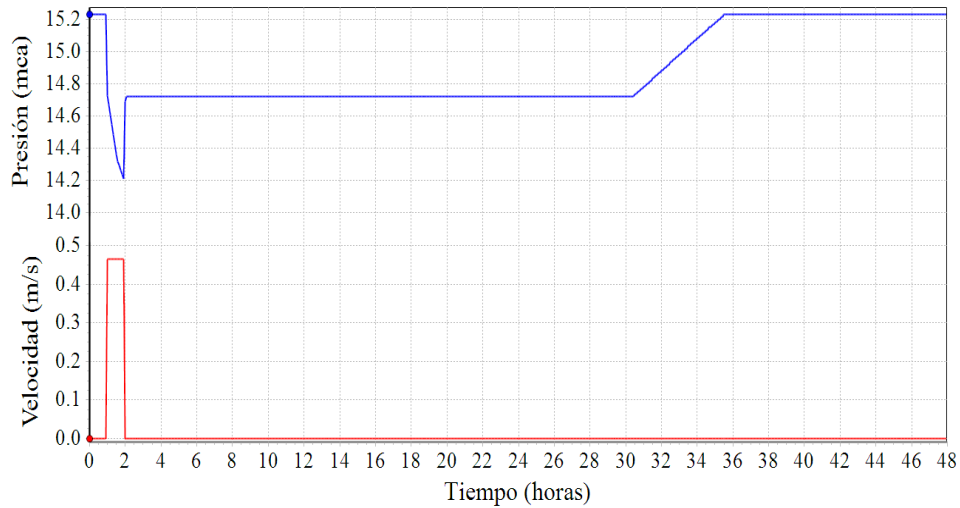


Figura 4.40 Variación de velocidad y presión de entrega de agua en el hidrante.

## 5 CONCLUSIONES

Las obras de aducción y de distribución, así como los tanques de almacenamiento son las estructuras del acueducto de Ciudad de los Niños que cuentan con los mayores porcentajes de riesgo sanitario. Únicamente las fuentes de captación de agua (PP, PF y PN) poseen porcentajes de riesgo sanitario menores al 50%.

La modelación de los tramos de tubería existentes parece indicar que los valores de velocidad en las líneas de distribución no cumplen con lo establecido por la Norma Técnica del AyA (2016). Mientras que los resultados obtenidos en tuberías de aducción por bombeo sugieren que hay cumplimiento conforme a lo estipulado en la Norma Técnica del AyA (2016), sin embargo, la tubería de aducción por gravedad no. Por otra parte, valores de presión obtenidos en la mayoría de los nodos son negativos lo cual, parece afirmar, que en el momento de mayor demanda la mayoría de los edificios carecen de servicio de agua.

Tras la modelación del sistema de abastecimiento propuesto para Ciudad de los Niños, se obtuvo que únicamente el nodo ASA no cumple con los valores de presión establecidos por la Norma Técnica del AyA (2016), durante el momento de mayor demanda. Mientras que el 96% de los datos de velocidad obtenidos en los tramos de tubería modelados no cumplen con lo estipulado por la Norma Técnica del AyA (2016).

Los datos obtenidos tras la modelación del sistema de abastecimiento propuesto indican que sería capaz de enfrentar situaciones de emergencia por aproximadamente una hora sin importar el momento del día en que se presente, brindando un caudal de 8,50 l/s y una presión de servicio mayor a 13 mca.

## **6 RECOMENDACIONES**

Se recomienda preservar un radio de protección de 40 metros respecto al pozo principal, con el fin de evitar que la fuente de agua se contamine.

Se sugiere realizar una calibración del modelo realizado en los tramos de tubería existente, con el fin de conocer el grado de similitud entre las condiciones reales de la red de distribución y tuberías de aducción respecto a los datos obtenidos en la modelación.

Los periodos de funcionamiento de las bombas se ven influenciados por el caudal de trabajo al que se someten, así, el periodo de funcionamiento de aquellas que impulsan agua desde un reservorio puede reducirse al contar con un mayor caudal de suministro. Por lo que se recomienda realizar un estudio que permita determinar la posibilidad de crear un pozo con mayor caudal de oferta que el existente u otro con un caudal similar y administrar los periodos de bombeo.

Debido a la aparente ineficiencia de la red de distribución, se recomienda la construcción de un nuevo acueducto capaz de brindar valores de presión adecuados a cada uno de los consumidores. La tenencia de una bomba en cada edificio para lograr abastecimiento en todos los puntos de consumo dentro la infraestructura, supone altos costos por gasto de electricidad, valor que puede ser eliminado al crear un acueducto eficiente. Se deben hacer sustituciones o reparaciones a los tanques de almacenamiento, así como las adaptaciones necesarias para alcanzar el cumplimiento con la normativa. Para lo anterior, se sugiere hacer un estudio económico para conocer el costo que implicaría su implementación y mejoras.

Los tramos de tubería que conducen agua al tanque de almacenamiento principal, pueden aprovecharse para ser usadas en la construcción de un nuevo acueducto. Así mismo, el tanque de almacenamiento principal puede, tras reparaciones, ser usado para el tanque de reserva para incendios y el tanque de reunión.

Debido a las características de riesgo con las que cuenta el pozo principal, es importante considerar la implementación de un tratamiento de desinfección para el agua ofertada.



## 7 REFERENCIAS

- Ahmadi, S. (2014). Positioning and Multimedia Broadcast/Multicast Services. En *LTE-Advanced* (pp. 1069–1105). Oxford: Elsevier.
- Araya, J. A. (2012). *Modelación del Cloro Residual en la Red de Distribución del Acueducto La Sirena, Cali*. Universidad del Valle.
- Arias, M. (2017). Consulta sobre población de animales en CDN. [Mensaje de correo electrónico].
- Asamblea Legislativa. Ley Forestal (1996). Costa Rica.
- AWWA. (2012). Steady-State Simulation. J. Edwards, L. Robinson, & L. Willnow (Eds.), *Computer Modeling of Water Distribution Systems* (Third). Denver: American Water Works Association.
- AWWA. (2014). Hydraulics. En *Manual of Water Supply Practices. Fiberglass Pipe Design* (Third). Denver: American Water Works Association.
- AWWA Staff. (2012). *Computer Modeling of Water Distribution Systems* (Third). Denver: American Water Works Assoc.
- AyA. Normas de diseño de agua potable y no autorización para el uso de tuberías de PVC-SDR-41, La Gaceta (2001). Costa Rica.
- AyA. Reglamento de Normas Técnicas y Procedimientos para el Mantenimiento Preventivo de los Sistemas de Abastecimiento de Agua (2009). Costa Rica. Recuperado de [https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/Reglamento de Normas Técnicas y Procedimientos para el Mantenimiento Preventivo de los Sistemas de Abastecimiento de Agua.pdf](https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/Reglamento%20de%20Normas%20Técnicas%20y%20Procedimientos%20para%20el%20Mantenimiento%20Preventivo%20de%20los%20Sistemas%20de%20Abastecimiento%20de%20Agua.pdf)
- AyA. Manual de Procedimientos de la Categoría de Entes Operadores (2015). San José, Costa Rica. Recuperado de [https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/Manual de Entes](https://www.aya.go.cr/laboratorio/selloCalidad/requisitosGalardon/Manual%20de%20Entes)

Operadores de Acueductos 20.10.2015.doc

AyA. Sistema de Abastecimiento de Agua Potable, Pub. L. No. Capítulo 1, Norma Técnica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento y Sistema Pluvial (2016). Costa Rica. Recuperado de [https://servicios.cfia.or.cr/Boletines/Archivos/ArchivosAdjuntos/201608/131169804732113747\\_SAP\\_julio 2016\\_CP\\_F\\_A.pdf](https://servicios.cfia.or.cr/Boletines/Archivos/ArchivosAdjuntos/201608/131169804732113747_SAP_julio 2016_CP_F_A.pdf)

Bejarano, E. (2013). *Diagnóstico del acueducto de Santa Cruz y Propuestas de Mejora*. Universidad de Costa Rica.

Bentley. (2017). WaterGEMS. Recuperado en Mayo 10, 2017, de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems>

Bentley Systems. (2008). User manual: WaterGEMS. United States.

Bentley Systems, Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2007). Assembling a Model. En A. Strafaci (Ed.), *Advanced Water En Distribution Modeling and Managment* (First). Pensilvania: Bentley Institute Press.

Bomberos de Costa Rica. Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendios (2013). Costa Rica.

Bomberos de Costa Rica. (n.d.). Reglamento a la Ley de Hidrantes 8641. Recuperado de <http://www.bomberos.go.cr/reglamento-a-la-ley-de-hidrantes-8641/>

Bryce, C., & Philp, J. (2005). Water Encyclopedia: *Domestic, Municipal, and Industrial Water Supply and Waste Disposal*. (J. Keeley, J. Lehr, & T. Kingery III, Eds.), *Journal of Environment Quality*. Edimburgo: JohnWiley & Sons, Inc.

CONAGUA. (s.f.). Diseño de redes de distribución de agua potable. En Comisión Nacional del Agua & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ed.), *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (p. 134). Ciudad de México. Recuperado de <http://www.mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro12.pdf>



- CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán, México. Recuperado de <http://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Conagua.pdf>
- Cruz, E. (2008). *Estación total aplicada al levantamiento topográfico de una comunidad rural*. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Recuperado de [http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/83/Estacion total aplicada.pdf](http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/83/Estacion%20total%20aplicada.pdf)
- DAB Pumps. (s.f.). JET 151-251-200-300 JET. Self-priming centrifugal electric pumps. Recuperado de <https://www.marcopumps.gr/files/specs/dab/dab-jet151-300.pdf>
- Dardari, D., Luise, M., & Falletti, E. (2012). *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques* (First). Oxford: Elsevier.
- Doran, D. (2010). *Site Engineers Manual. Construction Research and Innovation* (Second). Caithness: Whittles Publishing.
- EPM. (2009). Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM. Medellín, Colombia. Recuperado de [https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro\\_de\\_documentos/NormasDisenoSistemasAcueducto.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/NormasDisenoSistemasAcueducto.pdf)
- Espinoza, A., Morera, A., Mora, D., & Torres, R. (2004). *Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. San José. Recuperado de <http://www.bvs.sa.cr/php/situacion/agua.pdf>
- Franklin Electric. (2017). Submersible Pumps. Residential & Light Commercial. *J-Class*. Recuperado de [http://www.franklinwater.com/media/180845/mj5060\\_j-class\\_residential\\_submersible\\_catalog.pdf](http://www.franklinwater.com/media/180845/mj5060_j-class_residential_submersible_catalog.pdf)
- Gorse, C., Johnston, D., & Pritchard, M. (2012). *Construction, Surveying and Civil Engineering* (First). Oxford: Oxford University Press, Inc.
- IMN. Manual Técnico del Departamento de Aguas (2004). Costa Rica.

- Jiang, Y., Cui, Y., & Li, B. (2012). Study on differential GPS (DGPS): Method for reducing the measurement error of CNNS. En *Advanced Materials Research* (Vol. 3, pp. 75–80). Switzerland: Trans Tech Publications Lt.
- Jiménez, A. I. (2003). Atlas Costa Rica 2014.
- Magne, F. (2008). *Abastecimiento, diseño y construcción de sistemas de agua potable modernizando el aprendizaje y enseñanza de la asignatura de Ingeniería Sanitaria I*. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.
- Martínez, H. (2015). *Manual de Usuario: CivilCAD. Guía de instalación, ejercicios y apéndice*. Tijuana B.C.: ArqCOM S.A.
- Mays, L. (1999). Hydraulics of Water Distribution Systems. En *Hydraulic Design Handbook*. New York: McGraw-Hill Education.
- Merritt, F., & Ricketts, J. (2001). Plumbing - Water-Supply, Sprinkler and Wastewater Systems. En *Building Design and Construction Handbook* (Sixth). New York: McGRAW-HILL.
- Mora, A. V., Portuguez, C., & Mora, D. (2012). *Agua para consumo y saneamiento: Situación de Costa Rica en el contexto de Las Américas 1961-2011*. San José. Recuperado de [http://www.paho.org/cor/index.php?gid=219&option=com\\_docman&task=doc\\_view](http://www.paho.org/cor/index.php?gid=219&option=com_docman&task=doc_view)
- NFPA. Fire Code (2017). United States. Recuperado de <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1>
- OPS, CEPIS, & OMS. (2005). *Guías para el Diseño de Estaciones de Bombeo de Agua Potable*. Lima. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/agua/161esp-diseno-estbombeo.pdf>
- Pienta, G. (2015). *Plumbing Engineering Design Handbook. Volume 3*. Rosemont: American Society of Plumbing Engineers (ASPE).

- Prasuhn, A. (1992). *Fundamentals of Hydraulic Engineering*. South Dakota: Oxford University Press, Inc. Recuperado de <https://books.google.com.kh/books?id=W4Uh2DD2zE0C>
- Reyes, N. (2017). Consulta sobre proyección de crecimiento en CDN en los próximos 20 años. [Mensaje de correo electrónico]
- Ritchie, D. (2007). *Factors That Affect The Global Positioning System And Global Navigation Satellite System En An Urban And Forested Environment*. East Tennessee State University.
- Savic, D. A., & Banyard, J. K. (2011). *Water Distribution Systems*. London: ICE Publishing.
- Shammas, N., & Wang, L. (2016a). Pumping, Storage, and Dual Water Systems. En *Water Engineering - Hydraulics, Distribution and Treatment* (First). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Shammas, N., & Wang, L. (2016b). Water Distribution Systems: Components, Design, and Operation. En *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment* (First). New Jersey: JohnWiley & Sons, Inc.
- Shaughnessy, E., Katz, I., & Schaffer, J. (2005). Flow of an Inviscid Fluid: The Bernoulli Equation. En *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford: Oxford University Press Oxford.
- Tukker, M., Kooij, K., & Pothof, I. (2016). *Hydraulic design and management of wastewater transport systems*. London: IWA Publishing.
- UNICEF, MICS, & Ministerio de Salud. (2011). *Agua y Saneamiento en Costa Rica*. San José. Recuperado de [https://www.unicef.org/costarica/docs/cr\\_pub\\_Folleto\\_MICS\\_Agua\\_Saneamiento.pdf](https://www.unicef.org/costarica/docs/cr_pub_Folleto_MICS_Agua_Saneamiento.pdf)
- Urbina, J. (2017). Consulta sobre conexión de CDN a la tubería municipal. [Mensaje de correo electrónico].
- Valverde, L. (2017). Consulta sobre población en CDN. [Mensaje de correo electrónico].

## **8 APÉNDICES**

## APÉNDICE 1. REGISTRO FOTOGRÁFICO DURANTE LOS PROCESOS DE MEDICIÓN TOPOGRÁFICA Y DIAGNÓSTICO DEL ACUEDUCTO

En esta sección se incluyen las fotografías de mayor importancia a fin de constituir un aporte visual a las secciones de metodología, discusión y resultados de este documento.



Figura A.1.1 Levantamiento topográfico mediante el uso del GPS y la estación total en CDN



Figura A.1.2 Tanques de almacenamiento de agua del acueducto de CDN



Figura A.1.3 Estado estructural interno del pozo naciente



Figura A.1.4 Paredes internas del tanque de almacenamiento principal



Figura A.1.5 Sitio propuesto para la construcción del nuevo tanque de almacenamiento

## APÉNDICE 2. LLENADO DEL FORMULARIO DE INSPECCIÓN SANITARIA.

Se incluye únicamente la sección dos (diagnóstico de infraestructura) de cada uno de los formularios aplicados a los elementos estructurales del sistema de abastecimiento de agua de Ciudad de los Niños, los cuales fueron tomados del Formulario de Inspección Sanitaria (AyA, 2015). Las letras de color rojo en la columna de riesgo responden a las preguntas planteadas en la sección.

Cuadro A.2.1 Formulario aplicado al pozo naciente y su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. ¿Carece el pozo de cerca perimetral de protección o ésta está defectuosa?	S / N
2. ¿Carece el pozo de sello sanitario?	S / N
3. ¿Carece de un adecuado desagüe para las aguas de limpieza?	S / N
4. *¿Existen focos de contaminación (tales como letrinas, basureros, PTAR de aguas residuales, etc.) a menos de 20 m del pozo?	S / N
5. ¿Si existen letrinas en los alrededores, están a un nivel más alto que el pozo?	S / N
6. ¿Hay agua estancada en los alrededores del pozo?	S / N
7. ¿Carece el pozo de brocal o tapa que no permita su contaminación?	S / N
8. ¿Está el lote del pozo sucio y <b>enmontado</b> ?	S / N
9. *¿Está la tubería de la cachera de bombeo herrumbrada o rota (con fugas)?	S / N
10. ¿Está el pozo en una zona de inundación?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>40%</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.

Cuadro A.2.2 Formulario aplicado al pozo principal y su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. ¿Carece el pozo de cerca perimetral de protección o ésta está defectuosa?	S / N
2. ¿Carece el pozo de sello sanitario?	S / N
3. ¿Carece de un adecuado desagüe para las aguas de limpieza?	S / N
4. *¿Existen focos de contaminación (tales como letrinas, basureros, PTAR de aguas residuales, etc.) a menos de 20 m del pozo?	S / N
5. ¿Si existen letrinas en los alrededores, están a un nivel más alto que el pozo?	S / N
6. ¿Hay agua estancada en los alrededores del pozo?	S / N
7. ¿Carece el pozo de brocal o tapa que no permita su contaminación?	S / N
8. ¿Está el lote del pozo sucio y enmontado?	S / N
9. *¿Está la tubería de la cachera de bombeo herrumbrada o rota (con fugas)?	S / N
10. ¿Está el pozo en una zona de inundación?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>30%</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.

Cuadro A.2.3 Formulario aplicado al pozo finca y su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. ¿Carece el pozo de cerca perimetral de protección o ésta está defectuosa?	S / N
2. ¿Carece el pozo de sello sanitario?	S / N
3. ¿Carece de un adecuado desagüe para las aguas de limpieza?	S / N
4. *¿Existen focos de contaminación (tales como letrinas, basureros, PTAR de aguas residuales, etc.) a menos de 20 m del pozo?	S / N
5. ¿Si existen letrinas en los alrededores, están a un nivel más alto que el pozo?	S / N
6. ¿Hay agua estancada en los alrededores del pozo?	S / N
7. ¿Carece el pozo de brocal o tapa que no permita su contaminación?	S / N
8. ¿Está el lote del pozo sucio y <b>enmontado</b> ?	S / N
9. *¿Está la tubería de la cachera de bombeo herrumbrada o rota (con fugas)?	S / N
10. ¿Está el pozo en una zona de inundación?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>40%</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.



Cuadro A.2.4 Formulario aplicado al tanque de almacenamiento principal y su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. *¿Están las paredes agrietadas (concreto, mampostería, plástico) o herrumbradas (metálico)?	S / N
2. *¿La tapa de inspección está construida en forma inadecuada y/o <b>sin sistema seguro de cierre</b> ?	S / N
3. *¿La acera alrededor del tanque es de menos de 0,80 m de ancho o inexistente?	S / N
4. ¿La losa superior o techo está en malas condiciones de impermeabilidad?	S / N
5. ¿El nivel del agua en el tanque es menos de ¼ del volumen total o están las escaleras internas herrumbradas?	S / N
6. *¿Existe plantas, <b>raíces, sedimentos</b> , hojas, algas y animales dentro del tanque?	S / N
7. *¿Está ausente o <b>defectuosa</b> la cerca de protección perimetral alrededor del tanque?	S / N
8. * ¿Está el lote donde se ubica el tanque, sucio o enmontado?	S / N
9. *¿Existen focos de contaminación a menos de 20 m del tanque, tales como: letrinas, animales, viviendas, basura, actividad agrícola o industrial?	S / N
10. *¿Carece el tanque de rejilla de protección en respiraderos y tubería de rebose?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>80%</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.

Cuadro A.2.5 Formulario aplicado al tanque de almacenamiento secundario y su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. *¿Están las paredes agrietadas (concreto, mampostería, plástico) o herrumbradas (metálico)?	S / N
2. *¿La tapa de inspección está construida en forma inadecuada y/o <b>sin sistema seguro de cierre</b> ?	S / N
3. *¿La acera alrededor del tanque es de menos de 0,80 m de ancho o <b>inexistente</b> ?	S / N
4. ¿La losa superior o techo está en malas condiciones de impermeabilidad?	S / N
5. ¿El nivel del agua en el tanque es menos de ¼ del volumen total o están las escaleras internas herrumbradas?	S / N
6. *¿Existe plantas, raíces, <b>sedimentos</b> , hojas, algas y animales dentro del tanque?	S / N
7. *¿Está <b>ausente</b> o defectuosa la cerca de protección perimetral alrededor del tanque?	S / N
8. *¿Está el lote donde se ubica el tanque, sucio o <b>enmontado</b> ?	S / N
9. *¿Existen focos de contaminación a menos de 20 m del tanque, tales como: letrinas, animales, viviendas, basura, actividad agrícola o industrial?	S / N
10. *¿Carece el tanque <b>de rejilla de protección en respiraderos</b> y tubería de rebose?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>70%</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.

Cuadro A.2.6 Formulario aplicado líneas de tubería de aducción y distribución, así como su nivel de riesgo estructural

Preguntas establecidas	Riesgo
1. ¿Existen fugas visibles en la línea de conducción o distribución?	S / N
2. *¿Se observan tanques quiebra gradientes con tapas inadecuadamente contruidos, con grietas en las paredes y/o sin sistema seguro de cierre?	S / N
3. *¿Se observa tubería expuesta de PVC o con huecos en lugar de válvulas?	S / N
4. *¿El trayecto de la línea de conducción es a través de zonas agrícolas, porquerizas, lecherías, tenerías o industrias?	S / N
5. *¿Existen pasos de tubería elevados en mal estado o de PVC sin protección?	S / N
6. ¿Carece de cloro residual en algún tramo de la línea de distribución?	S / N
7. ¿Existen interrupciones constantes en el servicio de distribución de agua?	S / N
8. ¿El acueducto carece de un sistema para purgar la tubería de distribución?	S / N
9. ¿Carecen de fontanero o encargado del mantenimiento de las líneas de conducción y las redes?	S / N
10. ¿Carece la administración de plano del acueducto?	S / N
Total de fallas (GRADO TOTAL DE RIESGO DE LA ESTRUCTURA):	<b>60 %</b>

(\*) De existir dos o más opciones de riesgo en la pregunta, marcar el o los riesgos identificados.

### APÉNDICE 3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN TUBERÍAS REALIZADA EN CIVILCAD

Cuadro A.3.1 Cálculo de la línea de aducción entre el pozo principal y el tanque de almacenamiento principal

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
BC-C90	1	2	1.905	50.800	0.021	2.760	2.760	1.362	0.073	0.000	1337.218	1336.650	1341.408	1341.335	4.190	4.685
C90-C90	2	3	0.150	50.800	0.021	2.760	2.760	1.362	9.576	0.000	1336.650	1348.464	1341.335	1331.759	4.685	16.704
C90-C90	3	4	249.359	50.800	0.021	2.760	2.760	1.362	0.006	0.000	1348.464	1349.464	1331.759	1331.753	16.704	-17.711
C90-TAP	4	5	0.163	50.800	0.021	2.760	2.760	1.362	0.012	0.000	1349.464	1349.464	1331.753	1331.741	-17.711	-17.723

Cuadro A.3.2 Cálculo de la línea de aducción entre el acueducto municipal y el tanque de almacenamiento principal para horas de la noche

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
CTM-C90	1	2	95.366	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	2.206	0.000	1319.923	1323.923	1365.624	1363.418	45.701	39.495
C90-C90	2	3	7.916	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	0.183	0.000	1323.923	1323.712	1363.418	1363.235	39.495	39.523
C90-CS	3	5	379.863	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	8.779	0.000	1323.712	1331.919	1363.235	1354.456	39.523	22.537
C90-C45	3	4	0.150	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1323.712	1323.712	1363.235	1363.235	39.523	39.523
C45-TEE	5	6	52.717	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	1.218	0.000	1331.919	1336.187	1354.456	1353.238	22.537	17.051
TEE-FT	6	7	17.971	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1336.187	1337.187	1353.238	1353.238	17.051	16.051
TEE-TA	6	8	205.109	12.700	0.041	0.050	0.050	0.394	4.737	0.000	1336.187	1347.876	1353.238	1348.501	17.051	0.625

Cuadro A.3.3 Cálculo de la línea de aducción del acueducto municipal al tanque de almacenamiento principal para horas del día

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)			
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
CTM-C90	1	2	95.366	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	2.450	0.000	1319.923	1323.923	1344.531	1342.081	24.608	18.158		
C90-C90	2	3	7.916	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	0.203	0.000	1323.923	1323.712	1342.081	1341.878	18.158	18.166		
C90-CS	3	5	379.863	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	9.750	0.000	1323.712	1331.919	1341.878	1332.128	18.166	0.209		
C90-C45	3	4	0.150	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1323.712	1323.712	1341.878	1341.878	18.166	18.166		
C45-TEE	5	6	52.717	12.700	0.041	0.050	0.050	0.395	1.353	0.000	1331.919	1336.187	1332.128	1330.775	0.209	-5.412		
TEE-FT	6	7	17.971	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1336.187	1337.187	1330.775	1330.775	-5.412	-6.412		
TEE-TA	6	8	205.109	12.700	0.041	0.050	0.050	0.394	5.261	0.000	1336.187	1347.876	1330.775	1325.515	-5.412	-22.361		

Cuadro A.3.4 Cálculo de la línea de aducción entre el tanque de almacenamiento principal al tanque de almacenamiento secundario

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)			
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAP-C90	1	2	1.384	38.100	0.024	1.020	1.020	0.895	0.036	0.000	1349.464	1349.290	1397.964	1397.928	48.500	48.638		
C90-TAS	2	3	127.740	38.100	0.024	1.009	1.009	0.885	3.258	0.000	1349.290	1366.278	1397.928	1394.670	48.638	28.392		

Cuadro A.3.5 Cálculo del tramo de distribución de la tubería casa frailes

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)			
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAP-C90	1	2	18.842	76.2	0.01760	8.672	8.672	1.902	0.802	0.000	1348.064	1346.092	1357.682	1356.880	9.618	10.788		
C90-CF	2	3	73.939	38.1	0.01532	8.672	8.672	7.606	87.705	0.000	1346.092	1344.209	1356.880	1269.175	10.788	-75.034		

Cuadro A.3.6 Cálculo del tramo de distribución de la tubería templo

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAS-TEE	1.000	2.000	117.580	25.400	0.027	0.443	0.443	0.875	4.863	0.000	1365.161	1344.605	1374.033	1369.170	8.872	24.565
TEE-ABR	2.000	12.000	0.150	25.400	0.042	0.096	0.096	0.189	0.000	0.000	1344.605	1344.604	1369.170	1369.169	24.565	24.565
TEE-TEE	2.000	3.000	73.017	25.400	0.029	0.348	0.348	0.686	1.975	0.000	1344.605	1344.407	1369.170	1367.194	24.565	22.787
TEE-ACP	3.000	4.000	0.150	12.700	0.030	0.142	0.142	1.117	0.023	0.000	1344.407	1344.406	1367.194	1367.172	22.787	22.766
TEE-C90	3.000	5.000	22.629	25.400	0.033	0.206	0.206	0.407	0.247	0.000	1344.407	1344.308	1367.194	1366.948	22.787	22.640
C90-TEE	5.000	6.000	5.689	25.400	0.033	0.206	0.206	0.407	0.062	0.000	1344.308	1344.134	1366.948	1366.885	22.640	22.751
TEE-TEE	6.000	7.000	30.755	25.400	0.033	0.204	0.204	0.404	0.331	0.000	1344.134	1341.623	1366.885	1366.554	22.751	24.931
TEE-LL	6.000	11.000	1.853	12.700	0.000	0.002	0.002	0.012	0.000	0.000	1344.134	1344.203	1366.885	1366.885	22.751	22.682
TEE-C90	7.000	9.000	33.411	25.400	0.033	0.063	0.063	0.124	0.034	0.000	1341.623	1341.731	1366.554	1366.520	24.931	24.789
TEE-ALA	7.000	8.000	20.253	12.700	0.030	0.142	0.142	1.117	3.067	0.000	1341.623	1339.132	1366.554	1363.488	24.931	24.356
C90-IGL	9.000	10.000	0.390	25.400	0.033	0.063	0.063	0.124	0.000	0.000	1341.731	1341.739	1366.520	1366.519	24.789	24.780

Cuadro A.3.7 Cálculo del tramo de distribución de la tubería San Alonso

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAS-ASA	1	2	129.689	25.4	0.02693	0.443	0.443	0.875	5.364	0.000	1365.122	1354.173	1373.994	1368.630	8.872	14.457

Cuadro A.3.8 Tramo de distribución de la tubería principal

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAP-T45	1	2	20.399	76.200	0.015	19.512	19.512	4.278	3.742	0.000	1346.964	1346.060	1356.582	1352.840	9.618	6.780
T45-TEE	2	4	22.868	76.200	0.015	19.511	19.511	4.278	4.195	0.000	1346.060	1342.385	1352.840	1348.645	6.780	6.260
T45-CT	2	3	1.135	76.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1346.060	1346.094	1352.840	1352.840	6.780	6.746
TEE-TEE	4	5	103.415	76.200	0.015	18.978	18.978	4.162	18.043	0.000	1342.385	1337.156	1348.645	1330.602	6.260	-6.554
TEE-TEE	4	69	0.923	12.700	0.022	0.533	0.533	4.210	1.435	0.000	1342.385	1342.334	1348.645	1347.210	6.260	4.876
TEE-TEE	5	6	15.901	76.200	0.016	14.335	14.335	3.143	1.672	0.000	1337.156	1336.856	1330.602	1328.930	-6.554	-7.926
TEE-TEE	5	54	0.525	76.200	0.020	4.643	4.643	1.018	0.007	0.000	1337.156	1337.230	1330.602	1330.595	-6.554	-6.635
TEE-TEE	6	7	25.199	76.200	0.016	13.033	13.033	2.858	2.232	0.000	1336.856	1336.039	1328.930	1326.698	-7.926	-9.341
TEE-RA	6	53	3.551	25.400	0.021	1.302	1.302	2.569	0.983	0.000	1336.856	1336.972	1328.930	1327.947	-7.926	-9.025
TEE-TEE	7	9	12.547	76.200	0.016	13.033	13.033	2.858	1.111	0.000	1336.039	1335.723	1326.698	1325.587	-9.341	-10.136
TEE-COV	7	8	7.150	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1336.039	1335.929	1326.698	1326.698	-9.341	-9.231
TEE-TEE	9	11	28.407	76.200	0.016	13.033	13.033	2.858	2.516	0.000	1335.723	1334.749	1325.587	1323.071	-10.136	-11.678
TEE-COV	9	10	7.684	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1335.723	1335.652	1325.587	1325.587	-10.136	-10.065
TEE-TEE	11	20	1.469	76.200	0.017	11.021	11.021	2.417	0.096	0.000	1334.749	1334.683	1323.071	1322.975	-11.678	-11.708
TEE-TEE	11	12	2.687	25.400	0.019	2.012	2.012	3.971	1.616	0.000	1334.749	1334.205	1323.071	1321.455	-11.678	-12.750
TEE-C45	12	18	23.427	25.400	0.021	1.302	1.302	2.569	6.485	0.000	1334.205	1333.894	1321.455	1314.970	-12.750	-18.924
TEE-TEE	12	13	11.626	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	1.101	0.000	1334.205	1334.755	1321.455	1320.355	-12.750	-14.400
TEE-C90	13	16	19.491	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1334.755	1334.393	1320.355	1320.355	-14.400	-14.038
TEE-C45	13	14	10.710	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	1.014	0.000	1334.755	1334.753	1320.355	1319.341	-14.400	-15.412
C45-A SR	14	15	8.675	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	0.821	0.000	1334.753	1334.900	1319.341	1318.519	-15.412	-16.381
C90-LL	16	17	5.348	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1334.393	1334.393	1320.355	1320.355	-14.038	-14.038
C45-RL	18	19	3.222	25.400	0.021	1.302	1.302	2.569	0.892	0.000	1333.894	1333.004	1314.970	1314.078	-18.924	-18.926
TEE-TEE	20	21	26.256	76.200	0.017	9.719	9.719	2.131	1.372	0.000	1334.683	1333.840	1322.975	1321.603	-11.708	-12.237
TEE-RG	20	52	4.209	25.400	0.021	1.302	1.302	2.569	1.165	0.000	1334.683	1334.800	1322.975	1321.810	-11.708	-12.990
TEE-TEE	21	35	18.886	76.200	0.018	6.879	6.879	1.508	0.531	0.000	1333.840	1332.149	1321.603	1321.071	-12.237	-11.078
TEE-C90	21	22	52.225	25.400	0.018	2.841	2.841	5.606	58.201	0.000	1333.840	1333.510	1321.603	1263.402	-12.237	-70.108
C90-TEE	22	23	15.967	25.400	0.018	2.841	2.841	5.606	17.794	0.000	1333.510	1332.603	1263.402	1245.608	-70.108	-86.995
TEE-A SE	23	34	67.368	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	6.379	0.000	1332.603	1328.566	1245.608	1239.229	-86.995	-89.337
TEE-TEE	23	24	13.399	25.400	0.019	2.130	2.130	4.204	8.922	0.000	1332.603	1331.995	1245.608	1236.686	-86.995	-95.309
TEE-TEE	24	26	0.150	38.100	0.020	2.130	2.130	1.869	0.014	0.000	1331.995	1332.015	1236.686	1236.672	-95.309	-95.343
TEE-LL	24	25	0.300	25.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1331.995	1331.996	1236.686	1236.686	-95.309	-95.310
TEE-TEE	26	27	226.629	38.100	0.022	1.420	1.420	1.246	10.568	0.000	1332.015	1322.417	1236.672	1226.104	-95.343	-96.313
TEE-A SM	26	33	17.030	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	1.612	0.000	1332.015	1331.556	1236.672	1235.059	-95.343	-96.497
TEE-C90	27	28	72.581	38.100	0.026	0.710	0.710	0.623	0.998	0.000	1322.417	1321.242	1226.104	1225.105	-96.313	-96.137
TEE-RDC	27	31	7.969	38.100	0.026	0.710	0.710	0.623	0.110	0.000	1322.417	1322.096	1226.104	1225.994	-96.313	-96.102
C90-RDC	28	29	6.386	38.100	0.026	0.710	0.710	0.623	0.088	0.000	1321.242	1321.057	1225.105	1225.017	-96.137	-96.040
RDC-ASAG	29	30	19.022	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	49.174	0.000	1321.057	1319.332	1225.017	1175.843	-96.040	-143.489
RDC-A SN	31	32	5.581	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	14.427	0.000	1322.096	1321.606	1225.994	1211.567	-96.102	-110.039
TEE-TEE	35	37	62.527	76.200	0.019	5.577	5.577	1.223	1.209	0.000	1332.149	1330.269	1321.071	1319.863	-11.078	-10.406

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)			
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TEE-RC	35	36	2.998	25.400	0.021	1.302	1.302	2.569	0.830	0.000	1332.149	1332.165	1321.071	1320.242	-11.078	-11.923		
TEE-C90	37	42	0.267	76.200	0.022	3.432	3.432	0.753	0.002	0.000	1330.269	1330.260	1319.863	1319.860	-10.406	-10.400		
TEE-TEE	37	38	3.068	38.100	0.020	2.145	2.145	1.881	0.297	0.000	1330.269	1330.203	1319.863	1319.565	-10.406	-10.638		
TEE-C90	38	39	34.196	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	3.238	0.000	1330.203	1329.283	1319.565	1316.328	-10.638	-12.955		
TEE-CM	38	41	22.451	25.400	0.020	1.434	1.434	2.831	7.384	0.000	1330.203	1330.232	1319.565	1312.182	-10.638	-18.050		
C90-A SMG	39	40	13.769	25.400	0.024	0.710	0.710	1.401	1.304	0.000	1329.283	1328.872	1316.328	1315.024	-12.955	-13.848		
C90-TEE	42	43	54.644	38.100	0.018	3.432	3.432	3.011	12.250	0.000	1330.260	1331.674	1319.860	1307.610	-10.400	-24.064		
TEE-TEE	43	46	5.988	12.700	0.016	2.130	2.130	16.818	110.612	0.000	1331.674	1331.328	1307.610	1196.998	-24.064	-134.330		
TEE-C90	43	44	9.213	12.700	0.018	1.302	1.302	10.277	70.274	0.000	1331.674	1331.736	1307.610	1237.337	-24.064	-94.399		
C90-RH	44	45	1.440	12.700	0.018	1.302	1.302	10.277	10.987	0.000	1331.736	1331.780	1237.337	1226.350	-94.399	-105.430		
TEE-TEE	46	48	19.895	12.700	0.018	1.420	1.420	11.212	177.372	0.000	1331.328	1331.609	1196.998	1019.626	-134.330	-311.983		
TEE-A SMO	46	47	0.471	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	1.217	0.000	1331.328	1331.259	1196.998	1195.781	-134.330	-135.478		
TEE-C90	48	50	46.770	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	120.906	0.000	1331.609	1331.155	1019.626	898.720	-311.983	-432.435		
TEE-A SJ	48	49	0.813	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	2.101	0.000	1331.609	1331.677	1019.626	1017.525	-311.983	-314.152		
C90-A ST	50	51	0.150	12.700	0.020	0.710	0.710	5.606	0.388	0.000	1331.155	1331.155	898.720	898.333	-432.435	-432.822		
TEE-EA	54	68	25.978	38.100	0.025	0.896	0.896	0.786	0.537	0.000	1337.230	1339.433	1330.595	1330.058	-6.635	-9.375		
TEE-C90	54	55	0.612	50.800	0.019	3.747	3.747	1.849	0.041	0.000	1337.230	1337.807	1330.595	1330.554	-6.635	-7.253		
C90-TEE	55	56	47.001	38.100	0.018	3.747	3.747	3.287	12.329	0.000	1337.807	1337.170	1330.554	1318.225	-7.253	-18.945		
TEE-TEE	56	57	41.919	38.100	0.018	3.634	3.634	3.187	10.406	0.000	1337.170	1335.794	1318.225	1307.819	-18.945	-27.975		
TEE-C45	56	66	5.481	12.700	0.032	0.114	0.114	0.897	0.567	0.000	1337.170	1336.025	1318.225	1317.658	-18.945	-18.367		
TEE-TEE	57	58	10.581	25.400	0.018	2.829	2.829	5.583	11.705	0.000	1335.794	1335.403	1307.819	1296.114	-27.975	-39.289		
TEE-GIM	57	65	1.544	12.700	0.020	0.805	0.805	6.353	4.987	0.000	1335.794	1335.857	1307.819	1302.832	-27.975	-33.025		
TEE-C90	58	60	40.538	25.400	0.019	2.024	2.024	3.994	24.631	0.000	1335.403	1334.121	1296.114	1271.483	-39.289	-62.638		
TEE-GIM	58	59	1.636	12.700	0.020	0.805	0.805	6.353	5.285	0.000	1335.403	1335.506	1296.114	1290.829	-39.289	-44.677		
C90-C45	60	61	11.850	25.400	0.019	2.024	2.024	3.994	7.200	0.000	1334.121	1333.748	1271.483	1264.283	-62.638	-69.465		
C45-TEE	61	62	22.504	25.400	0.019	2.024	2.024	3.994	13.673	0.000	1333.748	1333.217	1264.283	1250.609	-69.465	-82.608		
TEE-CNJ	62	64	2.110	25.400	0.000	0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	1333.217	1333.325	1250.609	1250.609	-82.608	-82.716		
TEE-FNC	62	63	211.572	25.400	0.019	2.022	2.022	3.990	128.314	0.000	1333.217	1336.942	1250.609	1122.295	-82.608	-214.647		
C45-ENF	66	67	1.983	12.700	0.032	0.114	0.114	0.897	0.205	0.000	1336.025	1336.946	1317.658	1317.453	-18.367	-19.493		
TEE-TEE	69	72	0.150	12.700	0.036	0.076	0.076	0.598	0.008	0.000	1342.334	1342.323	1347.210	1347.203	4.876	4.880		
TEE-C45	69	70	1.722	12.700	0.023	0.458	0.458	3.612	2.041	0.000	1342.334	1341.845	1347.210	1345.169	4.876	3.324		
C45-OPO	70	71	21.968	12.700	0.023	0.458	0.458	3.612	26.041	0.000	1341.845	1340.236	1345.169	1319.129	3.324	-21.107		
C90-TEE	72	73	5.503	12.700	0.036	0.076	0.076	0.598	0.283	0.000	1342.323	1342.454	1347.203	1346.920	4.880	4.466		
TEE-SD	73	74	6.580	12.700	0.036	0.076	0.076	0.598	0.338	0.000	1342.454	1341.975	1346.920	1346.581	4.466	4.606		
TEE-LL	73	75	0.800	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1342.454	1342.183	1346.920	1346.920	4.466	4.737		

Cuadro A.3.9 Cálculo del tramo de distribución de la tubería talleres

DESCRIPCIÓN	TRAMO		LONGITUD (m)	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	COEF. RUGOSIDAD	GASTO INICIAL (l/s)	GASTO FINAL (l/s)	VELOCIDAD (m/s)	PÉRDIDA DE CARGA (m)		COTA DE TERRENO (m)		COTA PIEZOMÉTRICA (m)		CARGA DISPONIBLE (m)	
	De	a							TUBERÍA	ADICIONAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
TAP-TEE	1	2	58.938	50.8	0.01549	10.933	10.933	5.394	26.659	0.000	1346.964	1342.850	1357.324	1330.665	10.360	- 12.185
TEE-BM	2	4	10.963	50.8	0.01583	9.787	9.787	4.829	4.061	0.000	1342.850	1342.073	1330.665	1326.604	- 12.185	- 15.469
TEE-TLE	2	3	3.769	25.4	0.02150	1.146	1.146	2.262	0.832	0.000	1342.850	1342.933	1330.665	1329.833	- 12.185	- 13.100
TEE-TEE	4	6	20.675	50.8	0.01588	9.636	9.636	4.754	7.447	0.000	1342.073	1341.326	1326.604	1319.158	- 15.469	- 22.168
TEE-TLS	4	5	2.875	25.4	0.03585	0.151	0.151	0.298	0.018	0.000	1342.073	1341.926	1326.604	1326.586	- 15.469	- 15.340
TEE-TEE	6	8	14.293	50.8	0.01593	9.485	9.485	4.680	5.004	0.000	1341.326	1341.039	1319.158	1314.154	- 22.168	- 26.885
TEE-TLP	6	7	2.288	25.4	0.03585	0.151	0.151	0.298	0.015	0.000	1341.326	1341.409	1319.158	1319.143	- 22.168	- 22.266
TEE-TEE	8	17	3.890	50.8	0.01818	4.956	4.956	2.445	0.424	0.000	1341.039	1340.595	1314.154	1313.730	- 26.885	- 26.865
TEE-TEE	8	9	43.958	50.8	0.01852	4.529	4.529	2.235	4.081	0.000	1341.039	1338.895	1314.154	1310.073	- 26.885	- 28.822
TEE-BÑ	9	16	10.474	50.8	0.02465	1.273	1.273	0.628	0.102	0.000	1338.895	1338.585	1310.073	1309.971	- 28.822	- 28.614
TEE-TEE	9	10	0.300	50.8	0.01988	3.256	3.256	1.606	0.015	0.000	1338.895	1338.895	1310.073	1310.057	- 28.822	- 28.838
TEE-C90	10	12	47.110	50.8	0.01988	3.256	3.256	1.606	2.426	0.000	1338.895	1339.198	1310.057	1307.631	- 28.838	- 31.567
TEE-TEE	10	11	0.600	50.8	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1338.895	1339.495	1310.057	1310.057	- 28.838	- 29.438
C90-C90	12	13	68.195	50.8	0.01988	3.256	3.256	1.606	3.512	0.000	1339.198	1339.133	1307.631	1304.119	- 31.567	- 35.014
C90-C90	13	14	33.925	50.8	0.01988	3.256	3.256	1.606	1.747	0.000	1339.133	1339.138	1304.119	1302.371	- 35.014	- 36.767
C90-LL	14	15	0.600	50.8	0.01990	3.244	3.244	1.601	0.031	0.000	1339.138	1339.738	1302.371	1302.341	- 36.767	- 37.397
TEE-TEE	17	19	31.951	50.8	0.01824	4.871	4.871	2.403	3.379	0.000	1340.595	1339.370	1313.730	1310.351	- 26.865	- 29.019
TEE-OT	17	18	34.420	25.4	0.04295	0.085	0.085	0.168	0.083	0.000	1340.595	1341.079	1313.730	1313.646	- 26.865	- 27.433
TEE-TEE	19	21	9.198	50.8	0.01836	4.720	4.720	2.329	0.919	0.000	1339.370	1339.046	1310.351	1309.432	- 29.019	- 29.614
TEE-TLEB	19	20	4.095	25.4	0.03585	0.151	0.151	0.298	0.026	0.000	1339.370	1339.463	1310.351	1310.325	- 29.019	- 29.138
TEE-TEE	21	23	16.661	50.8	0.02028	2.974	2.974	1.468	0.730	0.000	1339.046	1337.984	1309.432	1308.701	- 29.614	- 29.283
TEE-COL	21	22	8.947	50.8	0.02288	1.746	1.746	0.861	0.152	0.000	1339.046	1337.085	1309.432	1309.279	- 29.614	- 27.805
TEE-TEE	23	25	0.357	50.8	0.02052	2.823	2.823	1.393	0.014	0.000	1337.984	1337.961	1308.701	1308.687	- 29.283	- 29.274
TEE-TLA	23	24	0.110	12.7	0.02970	0.151	0.151	1.191	0.019	0.000	1337.984	1337.951	1308.701	1308.683	- 29.283	- 29.268
TEE-TEE	25	27	96.662	50.8	0.02283	1.762	1.762	0.870	1.675	0.000	1337.961	1337.195	1308.687	1307.013	- 29.274	- 30.182
TEE-ALG	25	26	0.167	12.7	0.01878	1.061	1.061	8.376	0.885	0.000	1337.961	1337.932	1308.687	1307.802	- 29.274	- 30.130
TEE-TEE	27	29	52.277	50.8	0.02468	1.266	1.266	0.625	0.505	0.000	1337.195	1337.840	1307.013	1306.507	- 30.182	- 31.333
TEE-VIV	27	28	8.651	50.8	0.03128	0.496	0.496	0.245	0.016	0.000	1337.195	1337.263	1307.013	1306.996	- 30.182	- 30.267
TEE-C90	29	31	83.961	50.8	0.02560	1.089	1.089	0.537	0.623	0.000	1337.840	1338.778	1306.507	1305.884	- 31.333	- 32.894
TEE-CFN	29	30	7.555	50.8	0.04257	0.177	0.177	0.087	0.002	0.000	1337.840	1337.850	1306.507	1306.505	- 31.333	- 31.345
C90-PLL	31	32	39.799	50.8	0.02560	1.089	1.089	0.537	0.295	0.000	1338.778	1339.130	1305.884	1305.589	- 32.894	- 33.541



## APÉNDICE 4. RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PROPUESTA DE DISEÑO REALIZADA EN WATERGEMS

Se presentan tablas de resultados obtenidos en nodos y tramos de tubería a partir de la modelación realizada en WaterGEMS como propuesta de diseño para un sistema de abastecimiento de agua de consumo en Ciudad de los Niños.

Cuadro A.4.1 Resultados de tuberías de la modelación realizada en estado estático

Nodo inicial	Nodo final	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Pérdidas de carga (m/m)	Caudal (l/s)
TLE	BM	2,54	101,6	0.29	0.00	2.36
BM	SD	41,50	101,6	0.36	0.00	2.92
ASE	CM	100,53	101,6	0.13	0.00	1.09
TU	PP	253,16	50,8	0.00	0.00	0.00
AST	GIM	102,51	101,6	0.21	0.00	1.74
CTM	TU	768,13	12,7	0.00	0.00	0.00
TLE	ALG	146,65	101,6	0.26	0.00	2.09
ASA	BM	178,19	76,2	0.07	0.00	0.34
ADM	CM	213,95	101,6	0.09	0.00	0.73
CF	GIM	214,56	101,6	0.11	0.00	0.92
ALG	PLL	387,51	76,2	0.05	0.00	0.22
AST	CC	435,38	76,2	0.13	0.00	0.59
ASE	ALA	111,76	101,6	0.19	0.00	1.55
ALA	CF	72,25	101,6	0.23	0.00	1.90
TU	TA	166,37	50,8	0.00	0.00	0.00
CM	AST	171,72	101,6	0.10	0.00	0.83
ALG	GIM	142,85	101,6	0.15	0.00	1.21
TLE	AM	104,12	76,2	0.02	0.00	0.11
TA	SD	169,82	101,6	0.79	0.00	6.42
SD	CF	96,00	101,6	0.42	0.00	3.41
ASE	ASAG	350,09	76,2	0.05	0.00	0.23
ALA	ACP	98,99	76,2	0.05	0.01	0.24
TU	TR	2,76	76,2	0.00	0.00	0.00
TR	H	275,65	152,4	0.00	0.00	0.00

Cuadro A.4.2 Resultados nodos de la modelación realizada en estado estático

<b>Nodo</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>Demanda (l/s)</b>	<b>Presión (mca)</b>
AST	1333,08	0,38	31.99
PLL	1342,30	0,27	22.87
ALG	1337,69	0,77	27.50
ASAG	1332,32	0,26	32.73
ASE	1332,05	0,26	33.02
ACP	1343,27	0,36	21.87
ALA	1340,33	0,13	24.81
CF	1344,78	0,68	20.42
ADM	1341,11	0,85	23.92
GIM	1334,94	0,44	30.20
ASA	1353,58	0,39	11.73
AM	1344,35	0,13	20.97
BM	1344,65	0,26	20.67
TLE	1344,58	0,18	20.74
CM	1330,70	1,37	34.34
CC	1342,67	0,87	22.27
SD	1345,59	0,09	19.79

## **9 ANEXOS**

# ANEXO 1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS UTILIZADAS EN CDN

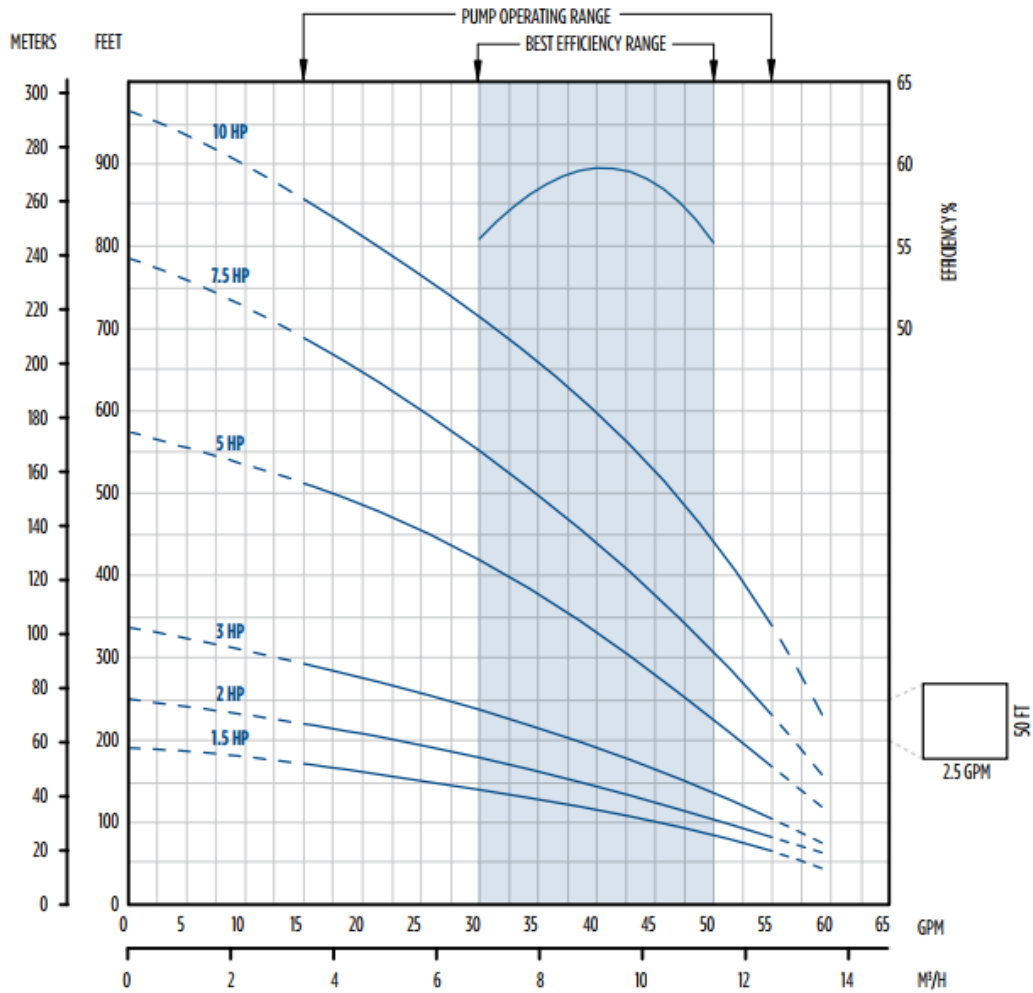


Figura B.1.1 Curva característica de la bomba usada en el pozo principal.  
Fuente (Franklin Electric, 2017)

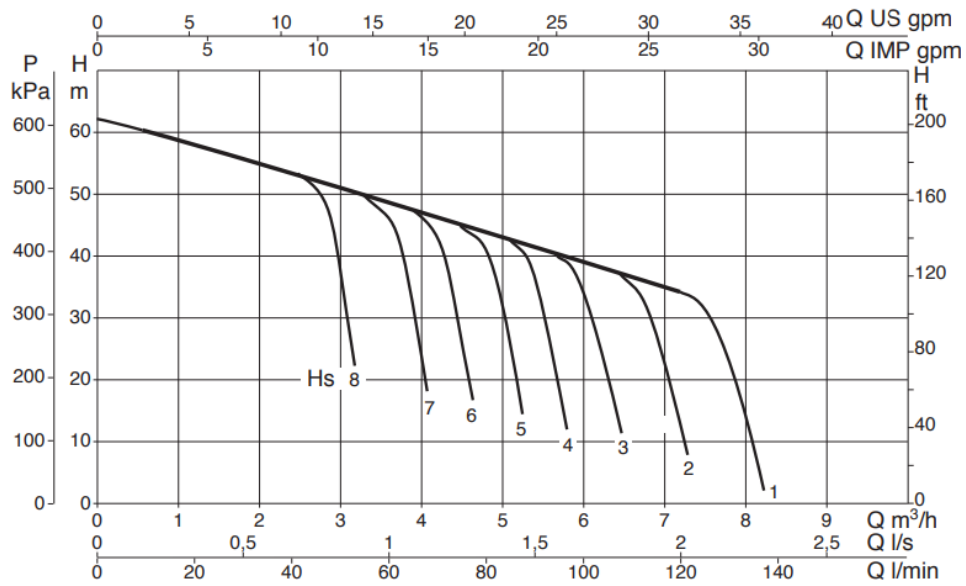


Figura B.1.2 Curva característica de la bomba utilizada para el suministro del TAS. Fuente: (DAB Pumps, s.f.)