

**DESINFECCIÓN DE AGUAS CRUDAS EN COMUNIDADES RURALES.  
UN ESQUEMA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL ACUEDUCTO VEREDAL SAN  
ROQUE EN EL MUNICIPIO DE MORALES (CAUCA)**



Universidad  
del Cauca

**MANUEL ELIECER ARTEAGA HORMAZA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2016**

**DESINFECCIÓN DE AGUAS CRUDAS EN COMUNIDADES RURALES.  
UN ESQUEMA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL ACUEDUCTO VEREDAL SAN  
ROQUE EN EL MUNICIPIO DE MORALES (CAUCA)**

**MANUEL ELIECER ARTEAGA HORMAZA**

**TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**Director:  
PhD. JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2016**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director

Popayán, 30 de septiembre de 2016

## AGRADECIMIENTOS

Muchos son los esfuerzos realizados para alcanzar la meta de terminar una carrera profesional, dejando atrás las dificultades personales y laborales; sin embargo, este logro no hubiese sido posible sin la influencia de personas tan valiosas que merecen mucho más que unas letras de agradecimiento.

Agradezco profundamente al destino por ponerme en el seno de una familia tan maravillosa junto a mis padres Eliecer y Teresa, quienes con su sacrificio y dedicación me inculcaron sus valores, me guiaron y apoyaron en todo momento y se convirtieron en mi mayor ejemplo a seguir en este largo camino; también, a mis abuelos, tíos y primos por todos los encuentros familiares para salir de la rutina, sus consejos y su apoyo incondicional.

A mis profesores, especialmente a mi director, el Ingeniero Javier Fernández, por ser mi maestro y compartirme sus conocimientos, experiencia y visión de la ingeniería ambiental, por su confianza y sus aportes a este proyecto; a los ingenieros Carlos Gallardo y Guillermo Chaux (Q.E.P.D.), a quienes les debo gran parte de mis conocimientos y por ser los principales motivadores para profundizar en el campo de la hidráulica.

A la comunidad de la vereda San Roque, por darme la posibilidad de culminar esta etapa formativa con el desarrollo de este trabajo; a la familia Pechené Tunubala, principalmente a Anderson y a doña Fabiola, quienes en todo momento estuvieron pendientes del sistema de desinfección.

Al equipo de trabajo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPOP 2012-2015), por darme la oportunidad de compartir junto a ellos y aprender un poco sobre las ciencias de la vulcanología y la sismología, enseñándome el valor de la disciplina y la responsabilidad en el entorno laboral.

A Carolina, por ser mi punto de equilibrio, por su cariño, comprensión y por ser esa persona motivadora e incondicional de la cual necesité en esta última etapa.

A mis grandes amigos, José, Leo y Jhon por convertirse en mí segunda familia, por los partidos de fútbol, los viajes, los momentos de risa, los consejos y el apoyo en las dificultades, gracias muchachos.

Finalmente, gracias a todas las personas de la comunidad universitaria con quienes coincidí en algún momento de este largo camino, a mis compañeros de carrera y futuros colegas, por las horas de tertulia, los trasnochos, los momentos buenos y las experiencias vividas que hoy forman parte de mi memoria y las guardo con gran aprecio... SIMPLEMENTE GRACIAS...

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO REFERENCIAL	17
5. MARCO TEÓRICO	19
5.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	19
5.2 EL AGUA EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO RURAL	19
5.3 ENFERMEDADES ASOCIADAS CON EL AGUA	19
5.4 LA DESINFECCIÓN DEL AGUA	20
5.4.1 Sistema de desinfección	21
5.4.2 Factores que influyen en la desinfección	21
5.4.3 Características de los agentes desinfectantes	21
5.4.4 Tipos de desinfección	22
5.4.5 Teoría de la cloración	23

5.4.5.1 Principales reacciones del cloro en el agua	24
5.4.5.2 Subproductos de la cloración	25
5.4.5.3 Curva de demanda de cloro	25
5.4.6 El riesgo de aplicar, o no aplicar, la desinfección con cloro	26
5.4.7 Cloración en comunidades pequeñas	26
6. METODOLOGÍA	28
6.1 DIAGNOSTICO GENERAL DEL ACUEDUCTO VEREDAL SAN ROQUE	28
6.2 ESTUDIO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	28
6.3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	29
6.4 DESARROLLO DEL SOFTWARE	30
7. RESULTADOS	31
7.1 DIAGNOSTICO GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ACUEDUCTO VEREDAL SAN ROQUE	31
7.1.1 Evaluación de la calidad del agua	31
7.1.2 Embalse sobre la quebrada El Cedro	32
7.1.3 Línea de conducción	33
7.1.4 Tanque de almacenamiento	34
7.1.5 Sistema eléctrico de bombeo	35
7.1.6 Red de distribución	36
7.2 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MAS APROPIADA PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA	37
7.2.1 Consideraciones generales	37

7.2.1.1 Consideraciones técnicas	38
7.2.1.2 Consideraciones económicas	38
7.2.1.3 Consideraciones sociales	38
7.2.1.4 Consideraciones normativas	39
7.2.1.5 Infraestructura existente	39
7.2.2 Características del desinfectante	39
7.2.3 Ubicación del sistema de desinfección	41
7.2.4 Método de dosificación	41
7.2.5 Costos	43
7.2.6 Tecnología seleccionada	44
7.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	46
7.3.1 Curvas de demanda de cloro	46
7.3.2 Determinación de la dosis óptima	48
7.3.3 Preparación de la solución desinfectante	48
7.3.4 Diseño final, operación y mantenimiento	50
7.4 DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA EL CONTROL Y REGISTRO DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	51
7.4.1 Iniciando el software	51
7.4.2 Registrar un nuevo usuario	52
7.4.3 Funciones del software	53
7.4.3.1 Dosificar	53
7.4.3.2 Desinfección Inmediata	53
7.4.3.3 Desinfección Controlada	54

7.4.3.4 Calibración del caudal de bombeo	55
7.4.3.5 Guardar datos	55
7.4.3.6 Menú Archivo	56
7.4.3.6.1 Cambiar de usuario	56
7.4.3.6.2 Ver datos guardados	56
7.4.4 Salir del programa	59
7.5 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	59
7.5.1 Materiales y costos	60
7.6 ARRANQUE DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	61
7.7 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN	62
7.7.1 Reducción del riesgo microbiológico	62
7.7.2 Operación y mantenimiento	67
7.7.3 Vulnerabilidad del sistema	68
8. CONCLUSIONES	69
9. RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXO	76



## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Principales enfermedades de origen hídrico y agentes responsables	20
Cuadro 2. Métodos de desinfección más comunes, según la naturaleza del agente desinfectante	22
Cuadro 3. Características desinfectantes del hipoclorito y las cloraminas	27
Cuadro 4. Cronograma de evaluación del sistema	30
Cuadro 5. Análisis físico, químico y microbiológico del agua de la quebrada El Cedro, realizado por el acueducto y alcantarillado de Popayán en octubre de 2014	32
Cuadro 6. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua de la quebrada El Cedro, determinados experimentalmente	32
Cuadro 7. Dimensiones internas del tanque de almacenamiento	35
Cuadro 8. Caudales de bombeo	36
Cuadro 9. Características generales de los principales desinfectantes usados en comunidades pequeñas	40
Cuadro 10. Equipos dosificadores de cloro más utilizados en pequeños sistemas de abastecimiento	42
Cuadro 11. Estimación de los costos de los sistemas dosificadores	44
Cuadro 12. Datos experimentales correspondientes a las curvas de demanda de cloro del agua proveniente de la quebrada El Cedro	47
Cuadro 13. Materiales y costos del sistema de desinfección	61
Cuadro 14. Resultados del análisis de las muestras con una dosis de 1,2 mg/L	63
Cuadro 15. Resultados del análisis de las muestras con una dosis de 1,8 mg/L	66

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación de la Vereda San Roque en el municipio de Morales	17
Figura 2. Esquema general del Acueducto Veredal San Roque	18
Figura 3. Variación porcentual del HOCl y OCl <sup>-</sup> en relación al pH	24
Figura 4. Curva de demanda de cloro.	26
Figura 5. Embalse sobre la quebrada El Cedro y estación de bombeo	33
Figura 6. Tanque de almacenamiento	34
Figura 7. Interruptor de nivel instalado en el tanque de almacenamiento	34
Figura 8. Motobombas instaladas en la estación de bombeo	35
Figura 9. Esquema del sistema dosificador seleccionado	45
Figura 10. Bomba sumergible utilizada para la dosificación del cloro	45
Figura 11. Interruptor de nivel tipo flotador	46
Figura 12. Muestras de agua con diferentes concentraciones de cloro aplicado	46
Figura 13. Curvas experimentales de demanda de cloro	47
Figura 14. Balance de masa para la preparación de la solución desinfectante	48
Figura 15. Diseño final del sistema de desinfección	50
Figura 16. Inicio de Cl <sub>2</sub> App	52
Figura 17. Ventana “Nuevo Usuario”	52
Figura 18. Ventana “Sistema de Desinfección”	53
Figura 19. Desinfección Inmediata	54

Figura 20. Desinfección Controlada	54
Figura 21. Calibración del caudal de bombeo	55
Figura 22. Menú “Archivo” de la ventana “Sistema de Desinfección”	56
Figura 23. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 1	56
Figura 24. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 2	57
Figura 25. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 3	57
Figura 26. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 4	58
Figura 27. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 5	58
Figura 28. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 6	59
Figura 29. Interruptores de nivel en el tanque de almacenamiento	59
Figura 30. Primera prueba de fugas del sistema de desinfección	60
Figura 31. Arranque del sistema de desinfección	62
Figura 32. Análisis colorimétrico de cloro y pH en una muestra originaria de la red de distribución.	64
Figura 33. Resultado positivo del análisis de coliformes totales en una muestra agua proveniente del embalse.	64
Figura 34. Resultado negativo del análisis de coliformes fecales en una muestra agua proveniente del tanque de almacenamiento	65
Figura 35. Especies de cloraminas en función del pH	67
Figura 36. Sedimentos en el tanque de 250 litros al final de un ciclo de desinfección	67

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Área mojada del tanque de almacenamiento	34
Ecuación 2. Calculo del caudal	36
Ecuación 3. Balance de masa del sistema	48
Ecuación 4. Caudal de dosificación de la solución desinfectante	49
Ecuación 5. Concentración de la solución desinfectante	49
Ecuación 6. Masa de hipoclorito de calcio granulado	49

## INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para la vida y se plantea como un derecho humano y fundamental. El tener acceso al servicio de agua potable se relaciona directamente con la salud y el desarrollo integral de cualquier comunidad (Álvarez, 2011); sin embargo, aún existen poblaciones que no cuentan con el servicio de agua potable y saneamiento básico por diversas razones que implican desde la disponibilidad del recurso hasta la voluntad política de los gobiernos.

Satisfacer la demanda de agua que requiere una colectividad es una tarea bastante dispendiosa y de gran cuidado especialmente en el sector rural, ya que una gran parte de los sistemas de abastecimiento no cuentan con unidades de tratamiento adecuadas y en la mayoría de los casos se prioriza la producción de agua sobre la calidad y seguridad de la misma (Solsona & Méndez, 2002); además, diferentes actividades productivas como la agricultura y la ganadería principalmente, hacen que se consuman grandes cantidades de agua, evidenciando así el mal uso que se hace sobre el recurso hídrico.

En 2015, cálculos estimados por UNICEF y la OMS indican que 663 millones de personas aún carecen de fuentes mejoradas de agua potable y de cada 10 personas en esta situación, se estima que 8 viven en zonas rurales (UNICEF & OMS, 2015); sumado a esto, en 2014 se planteaba que *“cada día, en el mundo mueren 1.400 niños menores de cinco años por causas relacionadas con la carencia de agua potable, saneamiento e higiene”* (UNICEF, 2014); considerándose lo anterior un problema a nivel mundial abordado en los ODM (objetivos del milenio) como una meta fundamental para garantizar la sostenibilidad del ambiente (DNP & SNU, 2005).

El Acueducto Veredal San Roque no es la excepción a lo mencionado anteriormente, la comunidad no hace uso racional y eficiente del recurso, situación que forma parte del diario vivir en algunas épocas de verano cuando disminuye considerablemente el caudal de su fuente de abastecimiento (quebrada El Cedro) y el consumo se incrementa por algunos usuarios que utilizan el agua para regar sus cultivos, causando un desabastecimiento a nivel general en la comunidad; sumado a lo anterior, el acueducto no posee un sistema de tratamiento que purifique el agua suministrada a los usuarios, poniendo en riesgo la salud de los usuarios.

En el presente proyecto se diseñó e implementó un sistema de desinfección para el Acueducto Veredal San Roque, cuya función principal recae en reducir el riesgo microbiológico generado por microorganismos patógenos causantes de diferentes enfermedades.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Diferentes enfermedades se asocian con el consumo de agua sin tratamiento, entre ellas las más relevantes son las EDA (enfermedades diarreicas agudas) que según estadísticas relacionadas con la mortalidad infantil a nivel mundial, hacia el año 2012 el 9,5% de las muertes se relacionan con las EDA, siendo la segunda causa de mortalidad en lo referente a enfermedades adquiridas después de la neumonía (GHO, 2012).

En países privilegiados como Colombia, en el cual la mayoría de sus regiones poseen abundancia de este recurso, la gestión sustentable del mismo por parte de los gobiernos pasa a un segundo plano al concentrar su esfuerzo en la industrialización y el desarrollo económico. Entre 2005 y 2013 en Colombia se registraron 2.931 muertes en menores de cinco años asociadas a las EDA con un promedio anual de 326 muertes y una desviación de 169; para 2012 se estimaba que en la mitad de la población colombiana que tiene dificultades en el acceso a fuentes de agua potable se presenta el 70% de los casos de mortalidad por EDA en menores de cinco años (MINSALUD, 2016).

Para el año 2013 se estimaba que la población urbana que utiliza fuentes mejoradas de agua potable alcanzaba el 96,8%, la población rural tan solo alcanzaba un 58,7% y en general se suponía un alcance promedio del 88,5% para la población total nacional (MINSALUD, 2016). En el departamento del Cauca, la cobertura del servicio de acueducto para el año 2010 era de apenas el 66% y específicamente para el municipio de Morales se estimaba que era de tan solo el 53%, muy por debajo del promedio nacional para el mismo año (83,4%), lo cual es una cifra bastante preocupante (CRC, 2010).

La vereda San Roque, perteneciente al municipio de Morales (Cauca) cuenta con un acueducto rural que abastece aproximadamente a 175 usuarios (800 personas) y consta de una bocatoma equipada con dos motobombas, un tanque de almacenamiento y las líneas de conducción y distribución. El agua es captada de un embalse construido sobre la quebrada el Cedro y no recibe tratamiento alguno antes de ser distribuida a los usuarios debido principalmente a la escasez de recursos, por tanto sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos representan un riesgo inminente para la salud integral de la comunidad, haciendo de este caso una particularidad que se debe asumir como una situación de emergencia (Solsona & Méndez, 2002).

## 2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de garantizar agua de alta calidad en los acueductos es innegable, particularmente en los rurales, donde la mayoría de las veces no se cuenta con recursos suficientes para suministrar agua potable a los usuarios; para este caso en específico, considerando que no existe un proyecto para el diseño y construcción de una planta de tratamiento ni tampoco se cuenta con los recursos económicos para dicho fin y teniendo en cuenta que este proceso tomaría un tiempo muy extenso, se hace necesario la implementación de alternativas que mitiguen de forma inmediata los riesgos que representa para la comunidad el consumo de aguas crudas provenientes de la quebrada El Cedro.

La implementación inmediata de un sistema de pre-tratamiento, como la desinfección, en el Acueducto Veredal San Roque que sea de bajo costo económico, de accesible tecnología para los usuarios y que genere agua de bajo riesgo microbiológico, forjará un impacto positivo en la comunidad al considerar este proceso como un primer paso para garantizar el derecho al consumo de agua potable, haciendo una inversión de forma indirecta sobre la prevención en salud al evitar gastos de recursos estatales destinados a la curación de enfermedades como las EDA, e impulsando la gestación de nuevas actividades socioeconómicas que mejoren la calidad de vida y los niveles de desarrollo humano.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema que permita el mejoramiento de la calidad de aguas crudas en sistemas rurales de abastecimiento, reduciendo el riesgo microbiológico que éstas representan y considerando las particularidades del acueducto perteneciente a la vereda San Roque (Morales-Cauca).

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Estudiar, diseñar e implementar un sistema de desinfección para el mejoramiento de la calidad del agua en la vereda San Roque (Morales-Cauca).
  
- ✓ Desarrollar un software para el cálculo y el registro de la desinfección aplicada al agua suministrada.
  
- ✓ Evaluar el impacto del sistema de desinfección en el agua suministrada a los usuarios de la vereda San Roque (Morales-Cauca).

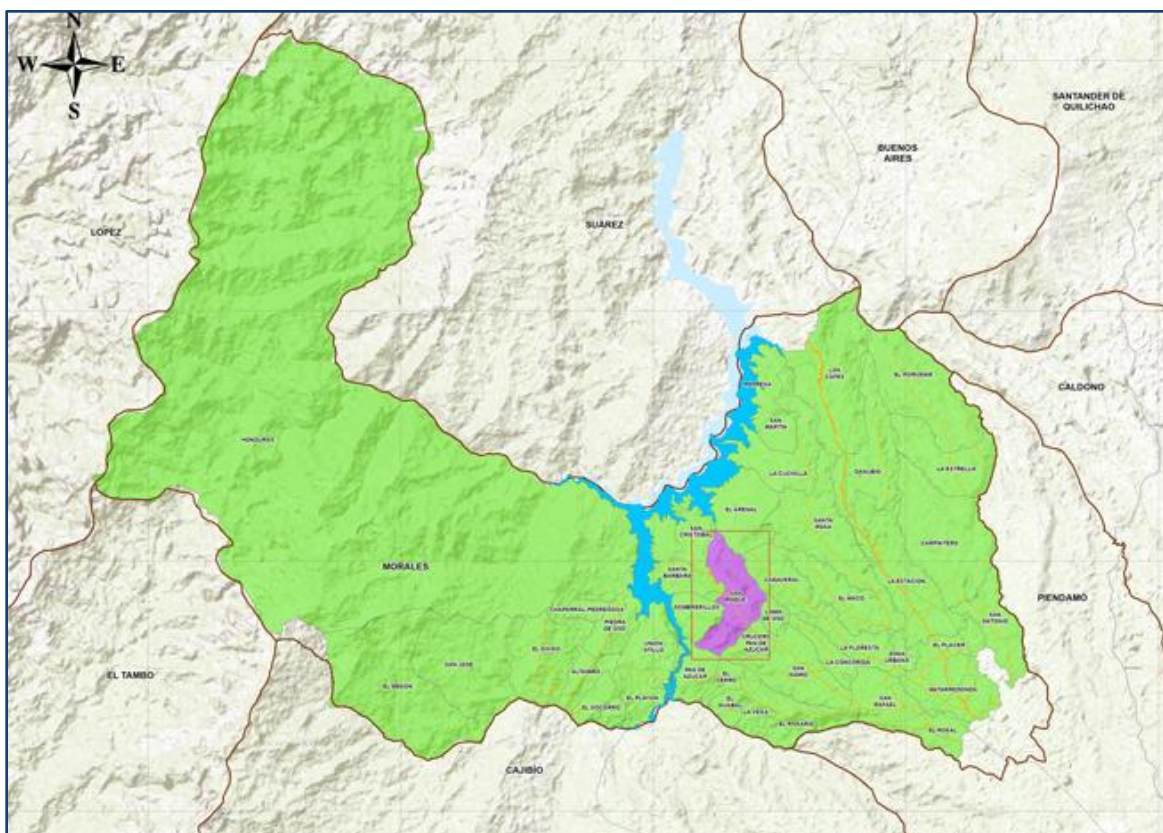


#### 4. MARCO REFERENCIAL

La vereda San Roque ( y una humedad relativa del 80%; las actividades económicas principales de la comunidad se centran en agricultura (café, caña de azúcar, maíz, plátano), ganadería, minería (oro, carbón) y explotación forestal; siendo la agricultura la actividad de mayor auge .

Figura 1), se encuentra ubicada en el área de influencia de la Salvajina a pocos kilómetros hacia el noroccidente de la cabecera municipal de Morales en el departamento del Cauca, presenta un clima templado con fluctuaciones de temperatura que oscilan entre los 14°C y 20°C, precipitaciones que oscilan entre 1500 y 3800 mm anuales y una humedad relativa del 80%; las actividades económicas principales de la comunidad se centran en agricultura (café, caña de azúcar, maíz, plátano), ganadería, minería (oro, carbón) y explotación forestal; siendo la agricultura la actividad de mayor auge (Alcaldía de Morales, 2016).

Figura 1. Ubicación de la Vereda San Roque en el municipio de Morales

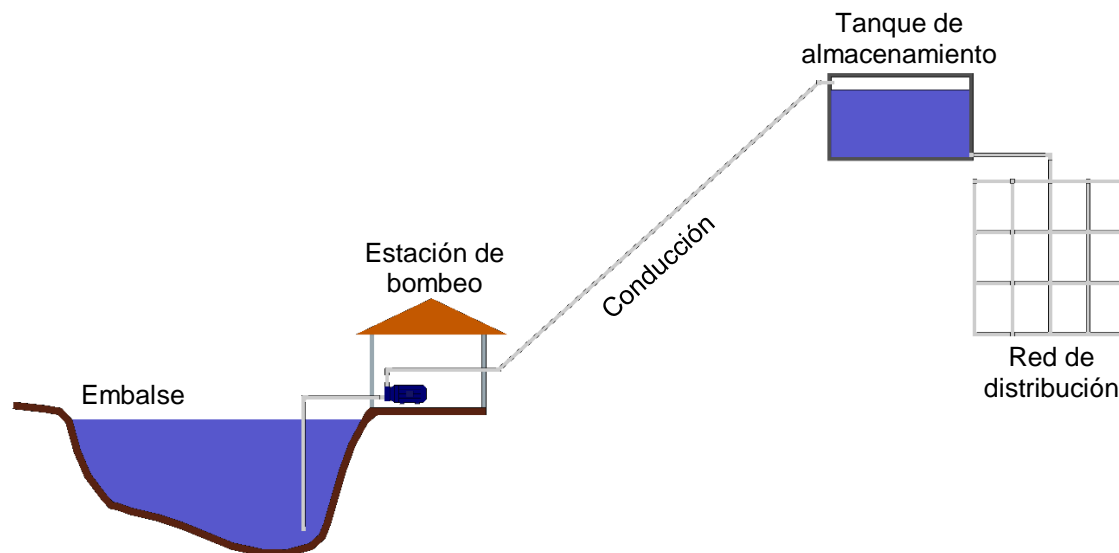


Fuente: Exposición pública de resultados preliminares, en la Vereda San Roque Morales, Cauca. –publicada en la página web del Ministerio de Agricultura.

El principal acceso a la vereda San Roque es por vía terrestre aproximadamente a veinte minutos en transporte público (camperos) desde la cabecera municipal de Morales a través de una carretera que en su mayoría no es pavimentada lo cual hace un poco difícil y tedioso el acceso, teniendo en cuenta también que la frecuencia con que se disponen vehículos para cumplir dicha ruta es muy baja.

La vereda San Roque tiene un acueducto rural de nombre homónimo, que abastece a 175 usuarios los cuales a su vez representan 800 personas aproximadamente. La infraestructura del Acueducto Veredal San Roque (Figura 2) está compuesta por un embalse construido sobre la quebrada el Cedro, un sistema eléctrico de bombeo automático que capta el agua para suplir la demanda de los usuarios, una línea de conducción que conduce el agua hasta el tanque de almacenamiento y finalmente se encuentra la red de distribución a los usuarios.

Figura 2. Esquema general del Acueducto Veredal San Roque



A nivel organizacional, el Acueducto Veredal San Roque cuenta con una junta directiva sobre la cual recaen acciones relacionadas con la operación y mantenimiento de las unidades del sistema, la facturación y el cobro a los usuarios, la gestión de los recursos y las inversiones, el mantenimiento de la cuenca y la reparación de daños en las líneas de conducción y red de distribución.

A pesar de los grandes esfuerzos que ha realizado la comunidad para mejorar el sistema de acueducto que poseen, no ha sido posible conseguir los recursos que les permitan construir una planta de tratamiento para acceder al servicio de agua potable, por lo cual están constantemente expuestos a padecimientos como las EDA y se hace supremamente necesario mitigar de inmediato el riesgo que les causa consumir el agua cruda proveniente de la quebrada El Cedro a través de la implementación de un sistema de desinfección.

## 5. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen brevemente los conceptos básicos más importantes sobre los cuales se desarrolló este trabajo.

### 5.1 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Sistema compuesto por diferentes estructuras que permiten suplir la demanda de agua de una población; por lo general incluye las etapas de captación del agua cruda, línea de aducción, línea de conducción planta de potabilización, tanque de almacenamiento y red de distribución a los usuarios (Adasa, 2016).

### 5.2 EL AGUA EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO RURAL

En ocasiones no se cuenta con la infraestructura suficiente para asegurar que el agua suministrada a la población por parte de los sistemas de abastecimiento rurales sea de alta calidad y no represente un riesgo para la salud de los consumidores; sin embargo, es común observar que estas poblaciones se conforman simplemente con el hecho de tener acceso a cualquier tipo de agua sin importar sus características fisicoquímicas, organolépticas y microbiológicas lo cual hace necesario diferenciar entre el concepto de agua potable y agua cruda.

**AGUA POTABLE:** agua que es apta y aceptable para el consumo humano y cumple con las normatividad de calidad de agua, reuniendo los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos exigidos (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

**AGUA CRUDA:** agua en estado natural disponible en fuentes superficiales o subterráneas que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

### 5.3 ENFERMEDADES ASOCIADAS CON EL AGUA

Las enfermedades relacionadas con el consumo de agua cruda o contaminada generan grandes impactos en la población a nivel mundial, incluso hasta el punto de causar la muerte principalmente en comunidades vulnerables como niños, ancianos e inmunodeficientes. Hoy en día, se considera que existe una amplia

variedad de microorganismos patógenos asociados al agua, los cuales pueden infectar a una persona como resultado de ingerir agua contaminada o a través de usos cotidianos que abarcan la preparación de comida y acciones de aseo; estos patógenos en la mayoría de los casos causan trastornos moderados en forma de gastroenteritis, dolores abdominales, diarrea o vomito con episodios de corta duración; sin embargo, también se presentan trastornos mucho más graves como el cólera, generando brotes de epidemias. En el Cuadro 1 se presenta un resumen de las enfermedades más comunes asociadas con el agua y sus agentes responsables.

Cuadro 1. Principales enfermedades de origen hídrico y agentes responsables

Enfermedades	Agentes
<p><b>Origen bacteriano</b>                      Fiebres tifoideas y paratifoideas                      Disentería bacilar                      Cólera                      Gastroenteritis aguas y diarreas</p>	<p><i>Salmonella sp.</i>  <i>Shigella sp.</i>  <i>Vibrio cholerae</i>  <i>Escherichia coli</i> enterotoxinógena  <i>Campylobacter</i>  <i>Yersina enterocolitica</i></p>
<p><b>Origen vírico</b>                      Hepatitis A y E                      Poliomiелitis                      Gastroenteritis aguas y diarreas</p>	<p>Virus hepatitis A y E                      Virus de la polio                      Virus de Norwak                      Rotavirus                      Enterovirus                      Adenovirus, etc.</p>
<p><b>Origen parasitario</b>                      Disentería amebiana                      Gastroenteritis</p>	<p><i>Entamoeba histolytica</i>  <i>Giardia Lamblia</i>  <i>Cryptosporidium</i></p>

Fuente: Adaptado de Guía para la selección de sistema de desinfección. Cuadro N°2. Principales enfermedades de origen hídrico y agentes responsables (OPS, 2007).

## 5.4 LA DESINFECCIÓN DEL AGUA

Para evitar las distintas enfermedades de origen hídrico, se requiere la aplicación de tratamientos que eliminen los patógenos causantes de estas, la desinfección del agua es un proceso mediante el cual se aplican agentes físicos o químicos que remueven los microorganismos patógenos del agua, minimizando el riesgo para la salud de los usuarios. A continuación, se mencionan algunas generalidades de la desinfección del agua y se hace énfasis en el uso del cloro como desinfectante.

**5.4.1 Sistema de desinfección.** Un sistema de desinfección está compuesto por diferentes estructuras y acciones que permiten entregar al usuario final un agua con el mínimo riesgo para su salud, mediante la destrucción de los agentes patógenos y la generación de una barrera protectora contra los mismos que garantice su eliminación en caso tal de ser introducidos nuevamente en el sistema de abastecimiento de agua. La selección de un buen sistema de desinfección debe ser equilibrada al analizar diferentes factores como la eficacia máxima del desinfectante sobre la variedad más amplia de condiciones microbiológicas esperadas; mejor economía a nivel general; disponibilidad de materiales e insumos y facilidades de acceso; efectos indeseables mínimos sobre el agua a tratar; facilidad de operación y mantenimiento; entre otros, con el fin de obtener la mejor calidad de agua posible a nivel microbiológico (OPS, 2007).

**5.4.2 Factores que influyen en la desinfección.** El proceso de desinfección se ve afectado por variables que pueden incrementar o por el contrario reducir la eficiencia de la destrucción de patógenos en el agua; entre los factores que afectan este proceso se encuentran: el tipo de microorganismos presentes en el agua, el agente desinfectante y su concentración, la temperatura del agua, la calidad del agua, el pH y el tiempo de contacto del agente desinfectante con el agua.

La resistencia de los microorganismos presentes en el agua contra un desinfectante, está relacionada con la capacidad de sus membranas celulares para soportar la intervención del mismo; por otra parte, a mayor concentración y mayor tiempo de contacto entre el agua y el agente desinfectante se obtendrán mayores eficiencias en la eliminación de microorganismos patógenos. En aguas crudas o con tratamientos deficientes, puede haber trazas de materia orgánica u otros elementos, haciendo que ciertos agentes desinfectantes reaccionen con estos compuestos cambiando su estructura e interfiriendo en la desinfección o incluso en algunos casos, cambiando las propiedades organolépticas del agua y generando compuestos tóxicos. Finalmente, la temperatura y el pH influyen directamente sobre propiedades del agente desinfectante como la solubilidad y su efectividad; para aguas alcalinas y con temperaturas altas se requiere una mayor dosis que en aguas con pH ligeramente ácidos y de menor temperatura, para generar igual efecto desinfectante a un mismo tiempo de contacto (De Vargas & Barrenechea Martel, 2004).

**5.4.3 Características de los agentes desinfectantes.** Los agentes desinfectantes que se apliquen al agua deben poseer una acción rápida y efectiva, ser fácilmente solubles en las concentraciones requeridas, ser capaces de proveer una acción residual que genere una barrera protectora ante nuevas posibles contaminaciones, no deben afectar significativamente el sabor, olor o color del agua y deben ser de fácil manipulación, control, transporte y aplicación (OPS, 2007).

**5.4.4 Tipos de desinfección.** Los tipos de desinfección del agua que actualmente se utilizan se dividen en dos grandes grupos que difieren principalmente por la naturaleza del agente responsable de la desinfección; para este caso, se van a clasificar en físicos y químicos. En el Cuadro 2 se detallan los más utilizados dentro de estos dos grupos.

Cuadro 2. Métodos de desinfección más comunes, según la naturaleza del agente desinfectante

<b>FÍSICOS</b>	<b>QUÍMICOS</b>
Sedimentación	Cloro
Filtración	Yodo
Ósmosis Inversa	Bromo
Calor	Ozono
Radiación UV	Permanganato de potasio
	Peróxido de hidrógeno

Fuente: Adaptado de Guía para la selección de sistema de desinfección. Cuadro 1. Métodos de desinfección del agua disponibles (OPS, 2007).

Los métodos físicos mencionados, a excepción del calor y la radiación UV, son empleados principalmente para otros usos como la remoción de sólidos, materia orgánica, turbiedad, color, metales pesados, entre otros.

La coagulación y floculación son acciones que utilizan sales químicas en su mayoría cargadas positivamente que propician una aglomeración de partículas coloidales incluyendo bacterias, virus y otros microorganismos que se eliminan del agua cruda por sedimentación en forma de lodos (Romero, 2012). La filtración en gravas y arenas de diferentes diámetros se utiliza para la remoción de sólidos, materia orgánica, color y microorganismos, su uso es ampliamente conocido en sistemas de abastecimiento rural; la ósmosis inversa (Medina San Juan, 2000), utiliza una membrana semipermeable para retener especies de peso molecular bajo aplicando altas presiones como fuerza motriz y su principal uso es la desalinización de aguas (Peng Lee, Arnot, & Mattia, 2011).

Elevar la temperatura del agua durante unos minutos hasta que alcance el punto de ebullición genera un ambiente muy hostil en el que la mayoría de los patógenos son eliminados, este es quizás uno de los métodos que más se aplican en los hogares que no cuentan con el servicio de agua potable.

La radiación UV inactiva los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y la acción enzimática de una amplia variedad de microorganismos; en zona rural, la desinfección solar es un mecanismo que se usa como solución para reducir el riesgo microbiológico (McGuigana, y otros, 2012).



En cuanto a los agentes químicos desinfectantes, se puede afirmar que son los más utilizados para la desinfección del agua y se caracterizan principalmente por ser oxidantes poderosos con alta eficiencia en la eliminación de microorganismos irrumpiendo en su sistema enzimático, membrana o pared celular (De Vargas & Barrenechea Martel, 2004). Los halógenos (cloro, yodo y bromo) tienen un alto poder bactericida, bajo costo y fácil aplicación, específicamente el cloro en sus diversas formas; sin embargo, en algunos casos presentan como mayor desventaja la formación de compuestos secundarios tóxicos al reaccionar con la materia orgánica presente en el agua (Galvín, 2015). El ozono es de gran acción bactericida y requiere tiempos de contacto sumamente cortos para desinfectar el agua pero no tiene la característica de permanecer en forma residual y por tanto se usa en situaciones de consumo inmediato; el peróxido de hidrogeno garantiza una rápida velocidad de acción, pero su deficiencia está en ser un compuesto inestable (Domènech, Jardim, & Litter, 2001); el permanganato de potasio se usa principalmente para la eliminación de hierro y manganeso, control de olores y sabores y en un segundo plano como algicida y bactericida (Franco, Ojeda, & Medialdea, 2005).

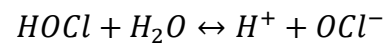
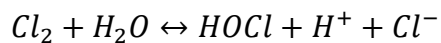
En resumen, a nivel de poder desinfectante y para pH comprendido entre 6.0 y 9.0 la jerarquía de los agentes más usados se establece de la siguiente forma: ozono > dióxido de cloro > cloro libre > cloraminas. Por el contrario, si relacionamos la estabilidad de estos compuestos y su persistencia en la red de distribución el orden sería: cloraminas > dióxido de cloro > cloro libre > ozono (Ramírez Quirós, Tratamiento de Desinfección del Agua Potable, 2005).

**5.4.5 Teoría de la cloración.** La cloración es la acción de añadir al agua cloro o alguno de sus compuestos, sin importar su estado físico, con el objetivo de eliminar los microorganismos patógenos presentes y reducir el riesgo microbiológico. En zonas rurales, es uno de los tipos de desinfección de mayor uso y aceptabilidad por los operarios debido a su facilidad de adquisición, su economía y su eficiencia en relación a sus costos (OPS, 2007).

El cloro como agente desinfectante presenta varias características favorables; entre estas, se destaca el requerir un bajo tiempo de contacto en relación a otros desinfectantes para desplegar su poder bactericida y capacidad residual, su disponibilidad y accesibilidad en forma de gas, tabletas o soluciones de hipoclorito, ser relativamente efectivo en la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos, además, de ser más económico con relación a otros desinfectantes y de mayor facilidad de aplicación debido a su alta solubilidad en agua (Oliveira Dantas Leite, 2011). Entre algunas desventajas que se atribuyen al cloro como agente desinfectante, su manejo debe realizarse con gran cuidado por ser muy corrosivo y generar riesgos para la salud de los operarios; además, puede modificar las características organolépticas del agua (sabor y olor principalmente) y formar subproductos como los trihalometanos (De Vargas & Barrenechea Martel, 2004).

El mecanismo por el cual el cloro lleva a cabo la desinfección, aún no es del todo conocido y depende en gran medida del tipo de sustrato sobre el cual se lleva a cabo la reacción. A nivel general, se sabe que el cloro produce la muerte de los microorganismos al oxidar y romper la pared celular e interferir en el metabolismo, causando un daño irreversible en el sistema enzimático de estos (Oliveira Dantas Leite, 2011).

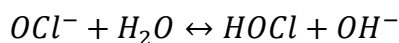
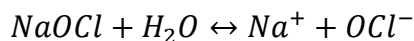
**5.4.5.1 Principales reacciones del cloro en el agua.** En cualquiera de sus formas (gaseosa, líquida o sólida), cuando el cloro reacciona con el agua se hidroliza, formando ácido hipocloroso HOCl e ion hipoclorito  $ClO^-$ ;  $pK_a = 7.8$ .



El pH tiene una influencia directa (Figura 3) sobre la concentración de cualquiera de las especies; tanto el ácido hipocloroso como el ion hipoclorito se consideran formas de cloro residual libre el cual posee un poder desinfectante mayor que el cloro residual combinado, en donde predominan las cloraminas.

El HOCl es la especie de mayor efecto desinfectante, se estima que es 80 veces más poderoso que el  $OCl^-$  y el rango en el cual predomina es  $5.0 < pH < 7.5$ ; por lo anterior, el efecto del cloro sobre aguas alcalinas tendrá menos potencia que en aguas neutras o ligeramente ácidas (Oliveira Dantas Leite, 2011).

Cuando se usa hipoclorito de sodio, la reacción con el agua es la siguiente:



Cuando se usa hipoclorito de calcio, la reacción con el agua es la siguiente:

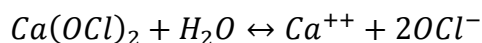
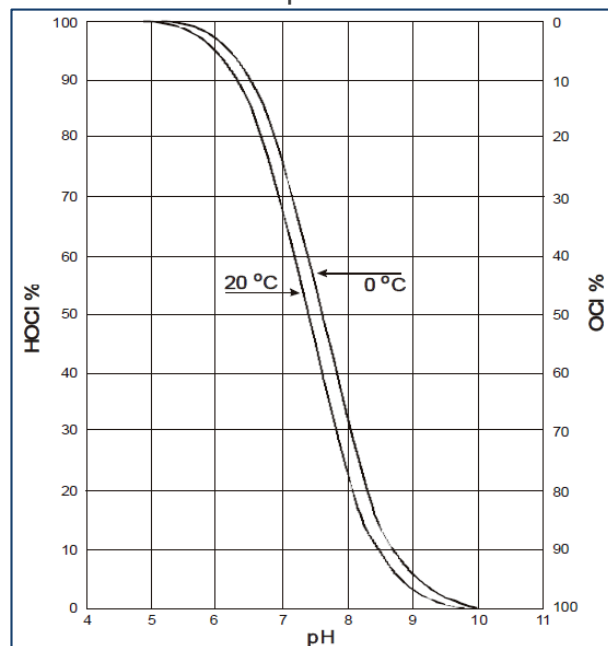


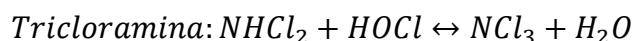
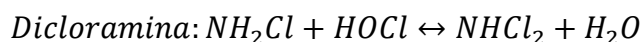
Figura 3. Variación porcentual del HOCl y  $OCl^-$  en relación al pH



Fuente: Tomado de Figura 10-5 Cantidades relativas de HOCl y  $OCl^-$  en diferentes valores de pH. (De Vargas & Barrenechea Martel, 2004)



Además de las reacciones anteriores, el cloro también reacciona con compuestos inorgánicos como el amoníaco, dando lugar a la formación de cloraminas dependiendo del pH sobre el cual se desarrolle la reacción. A pH 7 la especie predominante será la monocloramina, a pH cercano a 4.5 será la dicloramina, mientras que a pH < 4.0 predominará las tricloramina responsable de otorgarle al agua un sabor amargo. Estos compuestos se conocen comúnmente como cloro residual combinado; las reacciones para la formación de las cloraminas son las siguientes (Ramírez Quirós, Tratamiento de Desinfección del Agua Potable, 2005).



**5.4.5.2 Subproductos de la cloración.** El cloro, además de las especies mencionadas en la sección anterior, puede formar subproductos como los trihalometanos (THMs) y ácidos haloacéticos (HAAs) al reaccionar con la materia orgánica natural presente en el agua causando efectos perjudiciales en la salud a largo plazo (Sadiq & Rodríguez, 2004); la concentración de estos subproductos depende fuertemente de factores tales como la temperatura, pH, dosis, tiempo de contacto, compuestos inorgánicos y materia orgánica natural presente en el suministro de agua potable (Gopal, Tripathy, Bersillon, & Dubey, 2007). Se ha comprobado que compuestos como cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano, bromoformo, ácido dicloroacético, ácido tricloroacético, tricloroacetónitrilo, bromato y clorito pueden tener efectos cancerígenos para la salud humana (Chowdhury, Champagne, & McIellan, 2009).

**5.4.5.3 Curva de demanda de cloro.** Se utiliza comúnmente para determinar la dosis de cloro que se debe aplicar al agua para su desinfección (Figura 4); en esta curva se diferencian claramente cuatro etapas: consumo total del cloro aplicado (AB), formación de cloro residual combinado (BC), destrucción de algunos compuestos clorados (CD) y formación de cloro libre (DE).

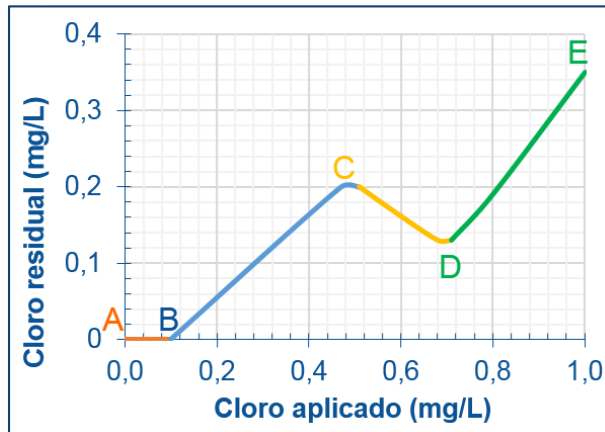
En la primera etapa (AB), se consume todo el cloro en las reacciones que se llevan a cabo esencialmente con la materia orgánica contenida en el agua; posteriormente en la segunda etapa (BC), al aumentar la dosis de cloro se da lugar a la formación de cloraminas y algunos compuestos organoclorados, lo que se conoce comúnmente como cloro residual combinado.

A partir del punto C se inicia la tercera etapa (CD) y el cloro adicional que se aplique empezará a destruir los compuestos generados en la segunda etapa hasta alcanzar

el punto D o también llamado “punto de ruptura”, cuando se alcanza ese momento, se puede afirmar que la demanda de cloro ha culminado.

A partir del punto D empieza la cuarta y última etapa (DE), en la que hay un exceso de cloro, conocido como cloro residual libre y su importancia recae en que es capaz de ejecutar nuevamente el proceso de desinfección de ser necesario (Oliveira Dantas Leite, 2011).

Figura 4. Curva de demanda de cloro.



Fuente: Adaptado de Figura 3: Curva Representativa de la Cloración a Punto de Ruptura (Oliveira Dantas Leite, 2011).

#### 5.4.6 El riesgo de aplicar, o no aplicar, la desinfección con cloro.

“En el caso del cloro, se estima que el riesgo de morir (mortalidad) por cáncer debido a la ingesta de agua desinfectada frente al riesgo de morir por alguna enfermedad de transmisión hídrica (diarrea, hepatitis infecciosa, fiebre tifoidea, cólera, etc.) es de 1 en 1.000. Dicho de otro modo, tomar agua sin desinfectar implica que una persona corre un riesgo 1.000 veces mayor de morir por una enfermedad diarreica, que morir por un cáncer asociado a la ingesta de aguas: ella está clorada.”<sup>1</sup>

**5.4.7 Cloración en comunidades pequeñas.** Los productos más comunes a base de cloro que se encuentran en el mercado para aplicaciones relacionadas con la desinfección son: cloro gaseoso, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio.

En el Cuadro 3 se presentan las características más comunes del hipoclorito y las cloraminas, desinfectantes a base de cloro que se usan regularmente en sistemas de abastecimiento de comunidades pequeñas.

El uso de cloro gaseoso se recomienda por lo general para caudales mayores a  $500 \text{ m}^3/\text{día}$  o en su defecto para poblaciones mayores a 5.000 habitantes; por otra parte, la cal clorada, el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio son recomendados para sistemas de abastecimiento relativamente pequeños o menores a 5.000 habitantes.

<sup>1</sup> Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). Desinfección del agua. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. p 54.

Cuadro 3. Características desinfectantes del hipoclorito y las cloraminas

FACTORES Y CONSIDERACIONES ESPECIALES	CARACTERÍSTICAS DEL DESINFECTANTE	
	HIPOCLORITO	CLORAMINAS
<i>CLASE DE USO:</i>	Primario y secundario	Secundario solamente
<i>EFICACIA DEL DESINFECTANTE:</i> Bacterias Virus Protozoos Helmintos	Muy bueno como HOCl Muy bueno como HOCl Regular Bueno	Deficiente Deficiente Muy deficiente -----
<i>INFLUENCIA DE:</i> pH  Alta turbiedad o sólidos suspendidos  Disminución de temperatura  Amoniaco / productos orgánicos	El aumento reduce la eficiencia  Protege a los microorganismos contra el desinfectante  Reduce la eficiencia  Se forman compuestos organoclorados	pH > 7; monoclóraminas pH < 5; dicloraminas  Protege a los microorganismos contra el desinfectante  Reduce la eficiencia  Poco efecto
<i>EFECTOS DEL DESINFECTANTE:</i> Sobre la salud  Sobre el sabor y olor	Ninguno a la dosis normal  Insignificante en ausencia de productos orgánicos	Ninguno a la dosis normal  Insignificante
<i>DERIVADOS IMPORTANTES:</i> Sabores/olores  Subproductos indeseables	De la reacción con productos orgánicos y fenoles  Trihalometanos, ácido acético clorado, haloácido nitrilos y otros.	Ninguno para monoclóraminas, moderado para dicloraminas y alto para tricloraminas.  Se forma cloruro de cianógeno
<i>TIEMPO DE CONTACTO:</i>	30 minutos	Muy largo

Fuente: Tomado de Cuadro N° 6. Características del desinfectante. Guía para la selección de sistema de desinfección. (OPS, 2007).

## **6. METODOLOGÍA**

La metodología se enmarcó en cuatro fases que incluyen el diagnóstico general del estado del Acueducto Veredal San Roque, la selección de la tecnología, diseño y construcción del sistema de desinfección, evaluación y ajustes del sistema de desinfección y el desarrollo del software.

### **6.1 DIAGNOSTICO GENERAL DEL ACUEDUCTO VEREDAL SAN ROQUE**

El diagnóstico general del acueducto se realizó mediante observación de la infraestructura y la indagación sobre diferentes aspectos en visitas programadas conjuntas con los representantes de la junta administrativa del acueducto.

Para evaluar la calidad del agua que se suministra a los usuarios, se tuvo en cuenta un análisis fisicoquímico y microbiológico realizado por personal del acueducto de Popayán en el cual se tomó una muestra puntual en la unión de los nacimientos que forman la quebrada El Cedro; adicionalmente se realizaron tres muestreos en el sitio de captación y en el tanque de almacenamiento en días diferentes, a los cuales se les aplicó un análisis de parámetros como coliformes fecales, turbiedad, color, temperatura y pH haciendo uso de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. (APHA, AWWA, & WPCF, 1992).

En el caso del embalse sobre la quebrada El Cedro se analizaron las operaciones de mantenimiento y el estado de sus estructuras. Para evaluar el sistema eléctrico de bombeo y determinar la cantidad de agua que se va a desinfectar, se planteó realizar mediciones indirectas del caudal de bombeo haciendo uso de las dimensiones del tanque de almacenamiento y del tiempo de llenado del mismo mediante la aplicación del principio volumen/tiempo. Por otra parte, se evaluó la línea de conducción, el tanque de almacenamiento y la red de distribución con base en las visitas de campo y la información entregada por la administración del acueducto en la cual se especificaron los materiales de construcción y algunos problemas que se han presentado con relación a estas.

### **6.2 ESTUDIO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN**

Se seleccionó el cloro como agente desinfectante ya que presenta varias características favorables para ser utilizado bajo las condiciones que presenta el Acueducto Veredal San Roque; la selección de la tecnología más apropiada para la dosificación del cloro se enmarcó en criterios generales que abarcan aspectos

técnicos, económicos, sociales y normativos principalmente; seguido a esto se realizó un análisis sobre las características principales de los desinfectantes más utilizados en pequeños sistemas de abastecimiento; luego, se procedió a evaluar las alternativas de dosificación incluyendo las características de los equipos dosificadores, ventajas y desventajas de los mismos; por último se analizaron los costos de las tecnologías más apropiadas y se seleccionó la mejor alternativa.

Para el diseño del sistema de desinfección se elaboraron curvas de demanda de cloro con el objetivo de hacer una estimación de la cantidad de desinfectante que el acueducto requería, posteriormente se determinó la ubicación del sistema y se procedió a dimensionar las estructuras necesarias para la construcción; dado que en el presente proyecto se desinfectará aguas crudas (aguas sin tratamiento) y que bajo estas condiciones es alta la posibilidad de formación de subproductos de la desinfección con cloro, nocivos para la salud de la comunidad, la dosis de cloro que se consideró para el dimensionamiento de las estructuras, comprendió valores que minimizan la probabilidad de generación de subproductos de la desinfección (THMs y HAAs), problemas de sabores y olores.

Después de determinar la dosis de cloro a aplicar, se estableció la capacidad del sistema de cloración teniendo en cuenta variables que afectan la frecuencia de vigilancia, control y mantenimiento del sistema; finalmente, se elaboró un listado de todos los materiales que se requirieron y se hizo un esquema del diseño definitivo, se procedió a construir y poner en marcha el sistema de desinfección de acuerdo con la topografía del terreno y las zonas disponibles del acueducto propias para tal fin.

### **6.3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN**

Una vez instalado el sistema de desinfección se procedió a evaluar su funcionamiento durante un periodo de doce semanas, para ello fue necesario tomar muestras del agua (una por semana) en diferentes puntos del acueducto que incluyen el sitio de captación del agua cruda, el tanque de almacenamiento y tres puntos distintos en la red de distribución, teniendo en cuenta los procedimientos técnicos apropiados para la recolección de estas (Severiche Sierra, Castillo Bertel, & Acevedo Barrios, 2013).

Con base en los resultados obtenidos de la evaluación del sistema, se realizaron los ajustes necesarios a la dosis de cloro hasta alcanzar valores de cloro residual que permitan cumplir la normatividad vigente y reducir el riesgo microbiológico para los usuarios; también, se establecieron parámetros para el control y registro de las actividades necesarias para la operación y mantenimiento del sistema de desinfección.

En el Cuadro 4 se presentan los parámetros evaluados y la cronología de la evaluación, cabe resaltar que hasta la semana ocho se tomaron muestras conjuntas de coliformes totales, coliformes fecales, cloro residual y pH; a partir de la semana nueve solo se evaluó cloro residual y pH.

Cuadro 4. Cronograma de evaluación del sistema

Parámetro	Punto	Tiempo (semanas)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coliformes totales	Embalse	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Tanque de almacenamiento	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 1	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 2	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 3	x	x	x	x	x	x	x	x				
Coliformes fecales	Embalse	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Tanque de almacenamiento	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 1	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 2	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Red de distribución 3	x	x	x	x	x	x	x	x				
Cloro residual	Embalse	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Tanque de almacenamiento	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH	Embalse	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Tanque de almacenamiento	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Red de distribución 3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

## 6.4 DESARROLLO DEL SOFTWARE

El software se desarrolló a partir de la necesidad de llevar un control y registro sobre las actividades que el sistema de desinfección requiere, así como también se buscaba minimizar la probabilidad de error del operario al momento de realizar los cálculos para la preparación de una dosificación adecuada, que depende de muchas variables y por tanto no es constante en el tiempo.

El software se construyó usando el lenguaje de programación Visual Basic; la interfaz del programa registrará en archivos de texto (\*.txt) diferentes datos que hacen referencia al usuario que accede al programa, como la fecha de ingreso, la concentración del cloro que se va a utilizar para la dosificación, la frecuencia de preparación de la misma y los caudales de bombeo principalmente.

## 7. RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación, se abordarán en varias fases necesarias para el cumplimiento de los objetivos y la metodología propuesta; dichas fases son:

- ✓ Diagnóstico del funcionamiento del Acueducto Veredal San Roque.
- ✓ Selección de la tecnología más apropiada para la desinfección del agua.
- ✓ Diseño del sistema de desinfección
- ✓ Construcción y arranque del sistema de desinfección.
- ✓ Evaluación del sistema de desinfección.
- ✓ Desarrollo del software para el control y registro del sistema de desinfección.

### 7.1 DIAGNOSTICO GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ACUEDUCTO VEREDAL SAN ROQUE

En esta sección, se detalla las condiciones de funcionamiento de cada uno de los componentes de la infraestructura del Acueducto Veredal San Roque que se mencionaron en el marco referencial y por supuesto, la evaluación de la calidad del agua de la quebrada El Cedro.

**7.1.1 Evaluación de la calidad del agua.** La calidad del agua depende de diversos parámetros que incluyen aspectos físicos, químicos y microbiológicos; para la evaluación de la calidad del agua de la quebrada El Cedro, se emplearon los resultados de un análisis realizado a una muestra por parte del personal del acueducto y alcantarillado de Popayán; estos resultados se muestran en el Cuadro 5.

De forma complementaria a esto, se realizaron tres muestreos más usando el agua del tanque de almacenamiento, los parámetros que se analizaron fueron turbiedad, color aparente, pH, temperatura y coliformes totales haciendo uso de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. (APHA, AWWA, & WPCF, 1992). En el Cuadro 6 se presentan los resultados obtenidos del análisis en el laboratorio.

De los resultados mostrados en el Cuadro 5 y Cuadro 6, con base en los criterios de la tabla B.2.1 del RAS-2000 que considera que una fuente es deficiente cuando los coliformes toman valores en el rango entre 500 y 5000 UFC/100 mL; se puede concluir, que la calidad de la fuente de agua que abastece el acueducto de la vereda

San Roque encaja en esta clasificación y representa un alto riesgo para la salud de la comunidad.

Cuadro 5. Análisis físico, químico y microbiológico del agua de la quebrada El Cedro, realizado por el acueducto y alcantarillado de Popayán en octubre de 2014

Análisis	Resultado	Unidad de medida
Conductividad	10,90	μS/cm
Turbiedad	4,00	N.T.U.
Color Aparente	30,90	UPC
pH	5,80	unidades de pH
Alcalinidad total	3,90	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	3,00	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Hierro total	0,40	mg/L Fe (II)
Nitritos	0,01	mg/L NO <sub>2</sub>
Nitratos	< 1,0	mg/L NO <sub>3</sub>
Sulfatos	2,00	mg/L SO <sub>4</sub>
Cloruros	2,00	mg/L Cl <sup>-</sup>
Aluminio	0,02	mg/L Al(III)
Olor	Aceptable	Observación cualitativa
Temperatura	18,00	°C
SDT	6,50	mg/L
Oxígeno Disuelto	7,50	mg/L
DBO <sub>5</sub>	3,30	mg/L
DQO	5,00	mg/L
Coliformes totales	2419,6	NMP
Coliformes fecales	517,2	NMP

Fuente: (Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P., 2014)

Cuadro 6. Parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua de la quebrada El Cedro, determinados experimentalmente

Muestra	Turbiedad (N.T.U.)	Color Aparente (UPC)	pH	Temperatura (°C)	Coliformes Totales (UFC)
1	4,00	29,00	6,10	17,60	5100
2	5,30	38,00	5,95	18,00	
3	4,80	35,00	6,05	18,30	
<b>Promedio</b>	<b>4,70</b>	<b>34,00</b>	<b>6,03</b>	<b>17,97</b>	
<b>Desviación</b>	0,66	4,58	0,08	0,35	

7.1.2 Embalse sobre la quebrada El Cedro. El embalse se construyó con el fin de retener el agua de la quebrada el cedro para su posterior captación y suplir las necesidades demandadas por la comunidad de la vereda San Roque (Figura 5). No obstante, debido al incremento de los usuarios, la quebrada El Cedro en épocas de verano no supe en su totalidad la demanda de los usuarios y el embalse disminuye



su nivel considerablemente, incluso en algunos casos, ha sido necesaria la suspensión del servicio por la falta de agua.

La presa del embalse está construida en hormigón reforzado y cuenta con una capacidad de aproximadamente 180 m<sup>3</sup>, y una profundidad máxima de 2.5 m; a pesar de encontrarse en un predio privado, en sus alrededores no posee un cerramiento que impida el ingreso de animales y bañistas. Las operaciones de mantenimiento se realizan por lo general cada seis meses y dependiendo del clima y las precipitaciones, este periodo podría aumentar; comúnmente dichas operaciones consisten en eliminar el lodo que se deposita en el fondo y podar la vegetación de las zonas aledañas.

Figura 5. Embalse sobre la quebrada El Cedro y estación de bombeo



**7.1.3 Línea de conducción.** La línea de conducción está construida en tubería de PVC con un diámetro nominal de 3 pulgadas; esta línea permite el transporte del agua desde la captación en el embalse hasta el tanque de almacenamiento, atravesando una distancia aproximada de 700 metros (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015). A nivel general en cuanto a estructura física, no presenta ningún problema, relacionado con fugas o roturas de tubería, pero al transportar agua no tratada, con el paso del tiempo se ha formado en el interior de la tubería una capa

biológica que se adhiere con gran fuerza, lo cual dificulta su limpieza y genera focos de contaminación difícilmente controlables.

**7.1.4 Tanque de almacenamiento.** Está construido en hormigón reforzado y tiene una capacidad máxima cercana a 30 m<sup>3</sup>; se encuentra ubicado aproximadamente a cincuenta metros por encima del nivel del embalse y cuenta con un dispositivo que detecta el nivel del agua en su interior, enviando una señal eléctrica que es captada por el sistema de bombeo para ejecutar el suministro.

La estructura tiene problemas de filtraciones y humedad, que aún no se han podido controlar y la abertura que permite el acceso al interior del tanque no tiene una compuerta que evite el ingreso de animales o insectos.

El mantenimiento se hace por lo menos una vez al mes, y consiste en el vaciado del tanque, remoción de los lodos, limpieza y desinfección del mismo utilizando elementos de aseo como escobas, blanqueadores y guantes (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015).

En este documento, se denominará área mojada del tanque ( $A_m$ ) a la diferencia entre el área del tanque y el área de la columna, este parámetro se utilizará en cálculos involucrados para la estimación de caudales de forma indirecta; de esta manera se tiene que:

Ecuación 1. Área mojada del tanque de almacenamiento

$$A_m = 18,530 \text{ m}^2 - 0,062 \text{ m}^2 = \mathbf{18,468 \text{ m}^2}$$

Figura 6. Tanque de almacenamiento



Figura 7. Interruptor de nivel instalado en el tanque de almacenamiento



Cuadro 7. Dimensiones internas del tanque de almacenamiento

Elemento	Longitud (m)			Área (L x B) (m <sup>2</sup> )
	Largo (L)	Ancho (B)	Alto (h)	
Tanque de almacenamiento	5,450	3,400	2,04	18,530
Columna interna	0,255	0,245	2,04	0,062

**7.1.5 Sistema eléctrico de bombeo.** El sistema está instalado en una estación de bombeo que se encuentra ubicada sobre el embalse, a unos 700 metros de distancia respecto al tanque de almacenamiento; funciona con energía eléctrica en promedio 4 horas por día, posee un accionamiento automático y opera mediante un sensor que detecta el nivel de agua en el tanque de almacenamiento, encendiendo el sistema cuando dicho nivel está por debajo del máximo, lo cual sucede aproximadamente unas 25 veces al día.

Este sistema está compuesto por dos motobombas (Figura 8) de 14 y 12 caballos de fuerza que se instalaron con el objetivo de alternar su funcionamiento y mantener un servicio continuo en caso de que alguna de las dos llegase a fallar; sin embargo, debido a una mala configuración en el tablero electrónico que se diseñó en la construcción de esta estación de bombeo, solamente se puede conectar una motobomba para lograr captar el agua del embalse y enviarla hasta el tanque de almacenamiento.

Cuando se presentan fallas, o es necesario hacer un mantenimiento del equipo que se encuentre en funcionamiento, el operario debe desconectar la motobomba actual y poner en marcha la segunda, conectándola al tablero electrónico de forma manual, esta es una tarea dispendiosa que en situaciones extremas genera interrupciones en el servicio de abastecimiento por la lejanía del lugar (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015).

Figura 8. Motobombas instaladas en la estación de bombeo



A pesar de lo anterior, la principal deficiencia del sistema de bombeo es el mal servicio de energía eléctrica que tiene el acueducto, siendo comunes las interrupciones y alteraciones bruscas en el voltaje debido a las fuertes tormentas eléctricas que se presentan en la zona; causando en algunos casos, graves daños en los equipos electrónicos, cuya reparación requiere de técnicos especializados, haciendo que el costo de estos sea bastante elevado (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015).



Con el fin de determinar la cantidad de agua que es captada por el sistema de bombeo, se realizaron mediciones indirectas del caudal de bombeo en el tanque de almacenamiento, haciendo uso de la Ecuación 2.

Ecuación 2. Calculo del caudal

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A_m \times h}{t}$$

Dónde,  $Q$ : Caudal  $V$ : Volumen  $t$ : Tiempo  
 $A_m$ : Area mojada del tanque  $h$ : altura del agua en el tiempo "t"

El área mojada del tanque se halla aplicando la Ecuación 1; con este valor, se procedió a calcular el caudal de bombeo, midiendo el tiempo en el que el agua alcanzaba una determinada altura en el tanque de almacenamiento (cerrando siempre las válvulas de salida del tanque antes de cada medición), y posteriormente aplicando la Ecuación 2; en el Cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones.

Cuadro 8. Caudales de bombeo

Altura: $h$ (m)	Tiempo: $t$ (s)	Caudal: $Q$	
		( $m^3/s$ )	(L/s)
0,56	1465	0,007059	7,059
	1428	0,007242	7,242
	1523	0,006791	6,791
1,08	2808	0,007103	7,103
	2746	0,007263	7,263
	2928	0,006812	6,812
1,6	4110	0,007189	7,189
	4055	0,007287	7,287
	4293	0,006883	6,883
<b>Promedio</b>		<b>0,007070</b>	<b>7,070</b>
<b>Desviación</b>		<b>0,000196</b>	<b>0,196</b>

El sistema de bombeo llena el tanque de almacenamiento en aproximadamente una hora con diez minutos, a razón de un caudal promedio de 7,07 L/s  $\pm$  0,196; sin embargo, con el pasar del tiempo este caudal disminuye debido al desgaste de la motobomba y por tanto se debe medir este parámetro periódicamente para llevar un control sobre el mismo.

**7.1.6 Red de distribución.** Toda la red está construida con tubería de PVC de diferentes diámetros, siendo 3 pulgadas el mayor diámetro nominal y ½ pulgada el menor. No se tiene un dato exacto sobre la extensión en metros de la red, sin embargo, el Acueducto Veredal San Roque invierte muchos recursos en su

mantenimiento puesto que al igual que la línea de conducción, la red de distribución también presenta problemas de biopelícula adherida a las tuberías y esto genera taponamientos en las duchas o grifos de las viviendas a las cuales transporta el agua (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015).

Sobre la red de distribución, la tubería de salida del tanque de almacenamiento se divide en dos ramales principales y cada uno cuenta con dos macromedidores con el objetivo de conocer la cantidad de agua que se envía a los usuarios, adicionalmente se tiene instalado para cada vivienda micromedidores que permiten llevar un control sobre el consumo de agua de cada usuario. Sin embargo se presenta una situación grave con las conexiones fraudulentas y el robo de agua, ya que es común que en todos los sistemas de acueductos se presente algún tipo de fuga pequeña o controlable debido a secciones de tubería en mal estado o daños ocasionales de la misma por sobrepresiones, etc., pero en el caso del Acueducto Veredal San Roque se ha llegado a comprobar a través de comparaciones realizadas entre la macromedición y la facturación de los metros cúbicos de agua gastados en el mes, el déficit de hasta un 30%, ante lo cual la junta directiva del acueducto en la práctica atribuye al robo en un gran porcentaje, situación que la han comprobado en más de una ocasión e inclusive ha sido necesario la denuncia a las autoridades competentes para el caso y la aplicación de multas (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015).

## **7.2 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MAS APROPIADA PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA**

De acuerdo a lo presentado en el marco teórico sobre los tipos de desinfección, la selección del sistema de desinfección se centrará en buscar la mejor tecnología para la aplicación del cloro como agente desinfectante considerando las particularidades del Acueducto Veredal San Roque. Lo anterior se justifica al seguir los lineamientos que respaldan al cloro como desinfectante predilecto para este tipo de sistemas de abastecimiento, en los que se presta el servicio a comunidades pequeñas y en este caso rurales, cuya ubicación geográfica limita los desplazamientos y el transporte, además de no disponer grandes recursos económicos y no contar con personal calificado para la operación y mantenimiento de otro tipo de unidades.

**7.2.1 Consideraciones generales.** A nivel general, se debe considerar aspectos técnicos, económicos, sociales y normativos para realizar una selección apropiada de la tecnología que más se adapte a las condiciones del Acueducto Veredal San Roque.

**7.2.1.1 Consideraciones técnicas.** No hace falta ahondar en que el agua suministrada a los usuarios representa un riesgo potencial grande al no recibir el más mínimo tratamiento; de acuerdo a los resultados de la calidad del agua de la quebrada El Cedro, mostrados en la sección 7.1.1; se debe tener en cuenta que se va a desinfectar un agua relativamente turbia con valores comprendidos entre 4.0 y 5.3 NTU, ligeramente acida con pH < 7.0 y cuya temperatura es alrededor de 18°C. Hay que resaltar también que el agua contiene sólidos disueltos (SDT) y materia orgánica (DBO<sub>5</sub>). El pH del agua de la quebrada El Cedro favorece la desinfección con cloro, pero sus niveles de turbiedad, sólidos y materia orgánica podrían interferir en esta, favoreciendo por ejemplo la formación de subproductos.

A pesar de lo anterior, quizá el aspecto técnico más importante a tener en cuenta es que el sistema de desinfección debe ajustarse automáticamente al sistema de bombeo eléctrico, dicho de otra forma, se debe dosificar el desinfectante solamente cuando se encienda el sistema de bombeo, en la cantidad y el tiempo adecuados para evitar una dosificación errada.

**7.2.1.2 Consideraciones económicas.** El aspecto económico siempre ha sido uno de los grandes problemas para la comunidad del Acueducto Veredal San Roque, puesto que el gobierno a nivel local no destina los suficientes recursos para la ampliación de la cobertura de servicios públicos, en este caso agua potable, teniendo como prioridades otros aspectos como por ejemplo la pavimentación de vías. No obstante, la comunidad ha presentado diversos proyectos en los cuales ha salido favorecida con recursos que les han permitido mejorar su infraestructura por etapas.

Actualmente, no cuentan con recursos suficientes como para pensar en siquiera el diseño de una planta de tratamiento que les permita potabilizar el agua y las utilidades que se generan con el pago de facturas por parte de los usuarios se destinan en más de un 90 % al mantenimiento del acueducto; pese a ello, están dispuestos a invertir en un sistema de desinfección, siempre y cuando no represente una carga económica importante teniendo en cuenta que el dinero para la manutención del mismo se obtendrá a partir de un incremento en el cargo básico que pagan los usuarios por el servicio.

**7.2.1.3 Consideraciones sociales.** A nivel social la mayoría de la comunidad que recibe el servicio de agua por parte del Acueducto Veredal San Roque, está dispuesta a mejorar en la medida de sus posibilidades económicas, la calidad del servicio. Además, el acueducto ya cuenta con una infraestructura organizacional bien establecida que permitirá acoplar al sistema de desinfección como una tarea más dentro de sus obligaciones. La comunidad también es consciente del riesgo que representa para ellos continuar con un abastecimiento de agua cruda, al punto

de tomar la iniciativa para implementar soluciones que les permitan minimizar este percance, solicitando por ejemplo a la comunidad universitaria el apoyo técnico para dicho fin.

**7.2.1.4 Consideraciones normativas.** El sistema de desinfección debe garantizar lo estipulado en la normatividad colombiana en cuanto al cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución, es decir, según el apartado 2 del artículo 9 de la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, debe estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L.

Por otra parte, también se debe garantizar el tiempo de contacto del cloro considerando a la fuente como altamente contaminada de acuerdo a lo establecido en el artículo 115 de la Resolución 1096 de 2000 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

**7.2.1.5 Infraestructura existente.** Es de resaltar que el acceso hasta la zona donde se encuentra la infraestructura del Acueducto Veredal San Roque presenta grandes limitaciones porque la vía no es pavimentada y no siempre se mantiene en buenas condiciones, especialmente en invierno, restringiendo en ocasiones el paso de varias clases de vehículos y haciendo que las motos sean la única alternativa de transporte; por tanto, el apoyo externo técnico y logístico para el sistema de desinfección dependerá de dichas condiciones. Por otra parte, no siempre se cuenta con la disponibilidad y fiabilidad del servicio de energía eléctrica, y los dispositivos que se implementen, en lo posible deben ser de fácil reparación o reemplazo.

A nivel de personal, no se cuenta con mano de obra calificada en lo relacionado al tema de desinfección, ya que las labores de fontanería son ejecutadas en gran parte por la misma comunidad, en su mayoría campesinos, a través de la programación de mingas.

**7.2.2 Características del desinfectante.** Las formas comerciales de cloro que comúnmente se ofrecen en el mercado son:

- ✓ Cloro gaseoso (Utilizado generalmente en poblaciones > 5.000 habitantes)
- ✓ Cal clorada
- ✓ Hipoclorito de sodio
- ✓ Hipoclorito de calcio

Específicamente, para la vereda San Roque, el lugar más cercano y fiable de abastecimiento de estos insumos es la ciudad de Popayán, ubicada aproximadamente a una hora por vía terrestre de la cabecera municipal de Morales.

Anteriormente en el Cuadro 3 se mostraban los aspectos técnicos más importantes de la cloración con hipoclorito y cloraminas y en complemento a lo ya mencionado, en el Cuadro 9 se muestran las principales características de los desinfectantes comerciales más utilizados en comunidades pequeñas.

Cuadro 9. Características generales de los principales desinfectantes usados en comunidades pequeñas

Nombre y fórmula	Nombre comercial	Aspecto	% Cloro activo	Estabilidad	Seguridad	Envase usual
<i>Cal clorada</i> $\text{CaO} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot 0.3\text{H}_2\text{O}$	Cal clorada, Polvo blanqueador, hipoclorito de calcio, cloruro de cal	Polvo blanco seco	15 a 35%	Media. Se deteriora rápidamente cuando se expone a Temperatura alta, humedad y/o luz solar. Pérdida de 1% al mes.	Corrosivo	Latas de 1.5 Kg Tambores de 45 a 135 Kg Bolsas de 25 a 40 Kg, otros.
<i>Hipoclorito de sodio</i> NaOCl	Hipoclorito de sodio, blanqueador líquido, lejía, agua lavandina, agua sanitaria	Solución líquida amarillenta	1 a 15% como máximo. Concentraciones mayores a 10% son inestables	Baja. Pérdida de 2- 4% por mes; mayor si la temperatura excede los 30°C	Corrosivo	Diversos tamaños de botellas de plástico y vidrio, y garrafones
	Hipoclorito de sodio por electrólisis <i>in situ</i>	Solución líquida amarillenta	0.1 – 0.6 %	Baja	Oxidante	Volumen variable
<i>Hipoclorito de calcio</i> $\text{Ca}(\text{OCl})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	HTH, Perclorón	Polvo, gránulos y tabletas. Sólido blanco	Polvo 20 – 35% Granulado 65 - 70% Tabletas 65 –70%	Buena. Pérdida de 2 a 2.5% por año	Corrosivo. Inflamación posible al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos.	Latas de 1.5 kg, tambores 45 a 135 Kg, baldes de plástico

Fuente: Tomado de Cuadro N° 4. Propiedades de los productos del cloro. Guía para la selección de sistema de desinfección. (OPS, 2007).

El hipoclorito de sodio se descarta como opción de desinfectante por tener el cloro activo y la estabilidad más baja en comparación con los otros productos. La cal clorada a pesar de encontrarse con facilidad en el mercado local, posee un componente activo de cloro relativamente bajo en comparación al hipoclorito cálcico granulado y en tabletas, lo cual repercute en un aumento considerable sobre la cantidad y el volumen que se debería comprar para abastecer el sistema de desinfección; además el hipoclorito de calcio tiene una mejor estabilidad perdiendo apenas del 2 al 2,5% anualmente en comparación con la cal clorada que pierde alrededor del 1% mensual. Por tanto, el desinfectante más apropiado para



implementar en el sistema en cuanto a características generales, es el hipoclorito de calcio en presentación granulada; este compuesto es de amplio uso en la desinfección de piscinas y se consigue con mucha facilidad en la ciudad de Popayán, en tambores de 40 Kg al 70% y 90% con precios que rondan los 270.000 COP y 350.000 COP respectivamente.

**7.2.3 Ubicación del sistema de desinfección.** La caseta donde se encuentra la estación de bombeo y la zona alta del tanque de almacenamiento son los únicos espacios disponibles para la instalación del sistema de desinfección, puesto que los predios donde se encuentran estas estructuras son propiedades privadas que no pertenecen al acueducto veredal; el criterio de selección de la ubicación se basa principalmente en la distancia a recorrer por parte de los operarios, por tanto el lugar indicado para construir el sistema de desinfección es la parte alta del tanque de almacenamiento que se encuentra ubicado a tan solo cincuenta metros de la casa del operario a diferencia de la estación de bombeo ubicada a veinte minutos caminando; por otra parte, la dosificación del cloro debe hacerse preferiblemente sobre el tanque de almacenamiento y no sobre la línea de conducción para evitar que la motobomba sufra corrosión de sus partes.

**7.2.4 Método de dosificación.** La aplicación del cloro en pequeños sistemas de abastecimiento se puede realizar mediante el uso de diferentes equipos cuyo funcionamiento depende principalmente de la fuerza impulsora del equipo, la naturaleza del desinfectante y el tamaño de la población servida.

Los equipos dosificadores de cloro se pueden dividir en tres grandes grupos dependiendo de la naturaleza del desinfectante: los que utilizan cloro gaseoso, los que utilizan una solución acuosa y los que utilizan materiales sólidos. Como ya se discutió anteriormente, el cloro gaseoso no es una opción para sistemas pequeños y por ende se hará énfasis en los equipos dosificadores que utilicen el desinfectante sólido o en solución; en el Cuadro 10 se muestra un resumen de los equipos mayormente utilizados para la desinfección del agua en pequeños sistemas de abastecimiento.

Los dosificadores de compuestos sólidos, específicamente los relacionados con la erosión de tabletas son económicos y durables puesto que los materiales involucrados en su construcción no son corrosivos y por lo general no presentan partes móviles, la operación y mantenimiento de estos equipos es sencilla y no requiere de personal calificado; el mecanismo utilizado es la inmersión de una columna de tabletas en el agua que se desea desinfectar, las tabletas se disuelven paulatinamente a medida que el agua fluye sobre ellas, liberando el cloro que requiere el sistema; quizás la principal desventaja de estos equipos es la precisión al momento de dosificar el cloro, debido a que el ajuste en la profundidad de inmersión de las tabletas no garantiza una dosis uniforme (Maya Achicanoy, 2004).

Cuadro 10. Equipos dosificadores de cloro más utilizados en pequeños sistemas de abastecimiento

Clasificación	Equipo dosificador	Producto	Rango de servicio
<b>Sólido</b>	Dosificador de erosión	Hipoclorito de Calcio	2.000 – 50.000 hab.
	Otros dosificadores	Cal clorada	< 2.000 hab.
<b>Solución</b>	<b>Generador de hipoclorito de sodio in situ</b>		< 5.000 hab.
	<b>Bajo presión atmosférica, de carga constante</b>		
	Tanque con válvula de flotador Tubo con orificio en flotador Sistema vaso /botella	Hipoclorito de Na o Ca	< 20.000 hab.
	<b>Bajo presión positiva o negativa</b>		
	Bomba de diafragma (+) Dosificador por succión (-)	Hipoclorito de Na o Ca	2.000 – 300.000 hab.

Fuente: Adaptado de Desinfección del agua. Capítulo 3. Cloro. p-8. (Solsona & Méndez, 2002)

La generación de hipoclorito de sodio in situ, por lo general requiere de equipos costosos y de cierta complejidad al momento de operarlos; el principal mecanismo que utilizan para la producción del hipoclorito es la electrolisis de una solución de cloruro de sodio, acto seguido se ejecuta su dosificación sobre el sistema de abastecimiento que se puede efectuar de diferentes maneras; cabe resaltar también que se debe disponer de una fuente de energía estable y equipos que garanticen la protección eléctrica del sistema y en el caso del acueducto veredal san roque, no se dispone de la infraestructura necesaria para implementar este tipo de equipos (Pérez Castillo, 2008).

Los equipos que utilizan la presión atmosférica como fuerza impulsora aplican el cloro en forma de una solución acuosa preparada y almacenada por lo general en un contenedor pequeño; la dosificación depende de variables como la altura del nivel del líquido, apertura parcial o total de las válvulas, el número y tamaño de orificios y por tanto estos equipos no permiten un control posterior eficaz al presentar un error considerable que habitualmente se atribuye a malas construcciones. Tienen como ventaja su economía por ser artesanales, de fácil construcción, operación y mantenimiento, y específicamente en este caso se considera como desventaja su dosificación en forma continua puesto que el flujo de agua que suministra el sistema eléctrico de bombeo es intermitente (OPS, 2007).

Los equipos que utilizan como fuerza motriz presiones diferentes a la atmosférica, son generalmente dispositivos Venturi y bombas de diafragma, los dos tienen la ventaja de adaptarse a interrupciones en el flujo y su instalación es relativamente sencilla, en el primer caso el cloro es succionado por el vacío creado por el dispositivo Venturi al conectarse a una tubería presurizada; en el segundo caso la bomba capta la solución desinfectante de un reservorio, la presuriza por encima de

la presión atmosférica y la aplica cantidades controladas por el operario sobre el sistema de abastecimiento (tuberías a presión, tanques de almacenamiento, etc). Los dispositivos Venturi tienen un rango de operación limitado en cuanto a variaciones de caudal y presión, estos dispositivos se deben adquirir con fabricantes especializados puesto que si se construyen artesanalmente no siempre se garantiza un funcionamiento adecuado; por otra parte, las bombas de diafragma gozan de la ventaja de calibrar con precisión la velocidad de dosificación en relación al flujo de agua, pero requieren de un mantenimiento continuo y delicado con el objetivo de garantizar su vida útil (Solsona & Méndez, 2002).

En resumen, los equipos dosificadores que más se adaptan a las condiciones particulares del Acueducto Veredal San Roque son los que utilizan como fuerza motriz presiones diferentes a la atmosférica, específicamente las bombas de diafragma.

**7.2.5 Costos.** En el Cuadro 11 se presenta la estimación de los posibles costos que debería asumir un sistema de abastecimiento al instalar los sistemas dosificadores de cloro que se mencionan.

Los costos de las tecnologías mencionadas son muy variables puesto que dependen de las particularidades que se presentan en la instalación del sistema de desinfección, la cantidad de producto que se aplicará, el tipo de control que se requiere en los sistemas de abastecimiento, la operación y mantenimiento.

No cabe duda que los sistemas más económicos y de mayor practicidad al momento de la instalación, son los que no requieren energía eléctrica, específicamente los sistemas que utilizan como fuerza motriz la presión atmosférica son los de menores costos, seguidos de los dosificadores de erosión; sin embargo, estos equipos no brindan precisión en la dosificación y su funcionamiento no admite interrupciones en el flujo, por tanto no son compatibles con las necesidades del Acueducto Veredal San Roque.

Cuadro 11. Estimación de los costos de los sistemas dosificadores

Clasificación	Equipo dosificador	*Descripción	**Costo (COP)
<b>Sólido</b>	Dosificador de erosión	Erosión de tabletas	450.000 a 1.200.000
	<b>Generador de hipoclorito de sodio in situ</b>	Celdas con sistemas de regulación eléctrica	1.500.000 a 30.000.000
<b>Solución</b>	<b>Bajo presión atmosférica, de carga constante</b>		
	Tanque con válvula de flotador	Hipoclorador con válvula de flotador, el tanque de solución y tuberías.	150.000 a 240.000
	Tubo con orificio en flotador	Hipoclorador con orificio sumergido de carga constante, el tanque de solución y tuberías.	60.000 a 180.000
	Sistema vaso /botella	Tanque de solución, tuberías y dispositivo vaso/botella.	30.000 a 150.000
	<b>Bajo presión positiva o negativa</b>		
	Bomba de diafragma (+)	Bomba de diafragma con controles eléctricos, tanque plástico para la solución y tuberías.	2.100.000 a 3.000.000
	Dosificador por succión (-)	Tanque de solución, tuberías y Venturi.	600.000 a 1.050.000

\*Para la estimación de costos en los sistemas de presión atmosférica de carga constante y presión positiva o negativa se tuvo en cuenta los gastos que genera el uso de hipoclorito de sodio por Kg de cloro disponible.

\*\*La estimación de los costos se realizó con un tasa de conversión promedio de 3.000 COP por cada dólar.

Fuente: Adaptado de Desinfección del agua. Capítulo 3. Cloro. p-33. (Solsona & Méndez, 2002)

**7.2.6 Tecnología seleccionada.** Haciendo un resumen de las tecnologías que se podrían acoplar al sistema de abastecimiento del Acueducto Veredal San Roque considerando los aspectos técnicos, económicos, sociales, normativos y la infraestructura existente, se tiene al hipoclorito de calcio en tambor por 40 Kg como la mejor alternativa entre las formas de cloro comerciales para suplir la demanda; en cuanto a los equipos dosificadores, la aplicación de una solución desinfectante por medio de bombas de diafragma o dispositivos Venturi son los que presentan más ventajas en relación a los otros; finalmente en cuanto a costos, los dispositivos Venturi son relativamente más económicos que las bombas de diafragma.

A pesar de considerar las opciones anteriores, se optó por un sistema dosificador innovador, económico, semiautomático, de fácil operación y mantenimiento, diseñado especialmente para las condiciones que exige el sistema de abastecimiento del Acueducto Veredal San Roque (Figura 9).

En este sistema, se utilizará como espacio de contacto el tanque de almacenamiento y dependiendo de la demanda de agua de la comunidad, este no se vacía por completo en menos de 45 minutos aproximadamente, tiempo suficiente para garantizar que la acción desinfectante del cloro sea efectiva.

Para dosificar la solución desinfectante, el sistema se vale de una bomba sumergible (Figura 10), de uso común para la creación de fuentes artificiales o en acuarios para la generación de corrientes que homogenicen el agua con el objetivo de regular la temperatura y la química del entorno, instalada en el interior de un tanque plástico comercial de 250 litros y accionada automáticamente por interruptor de nivel (Figura 11) acoplado al tanque de almacenamiento y de características similares al sensor que se encuentra conectado el sistema de bombeo que suministra el agua; de esta forma, se garantiza que el sistema de desinfección se encienda y se apague de forma simultánea con el sistema de bombeo, dosificando el cloro en la cantidad necesaria y durante el tiempo adecuado.

La gran ventaja que tiene el sistema diseñado sobre los sistemas que utilizan bombas de diafragma, radica sustancialmente en el aspecto económico y operativo, ya que en el mercado la bomba de

Figura 9. Esquema del sistema dosificador seleccionado

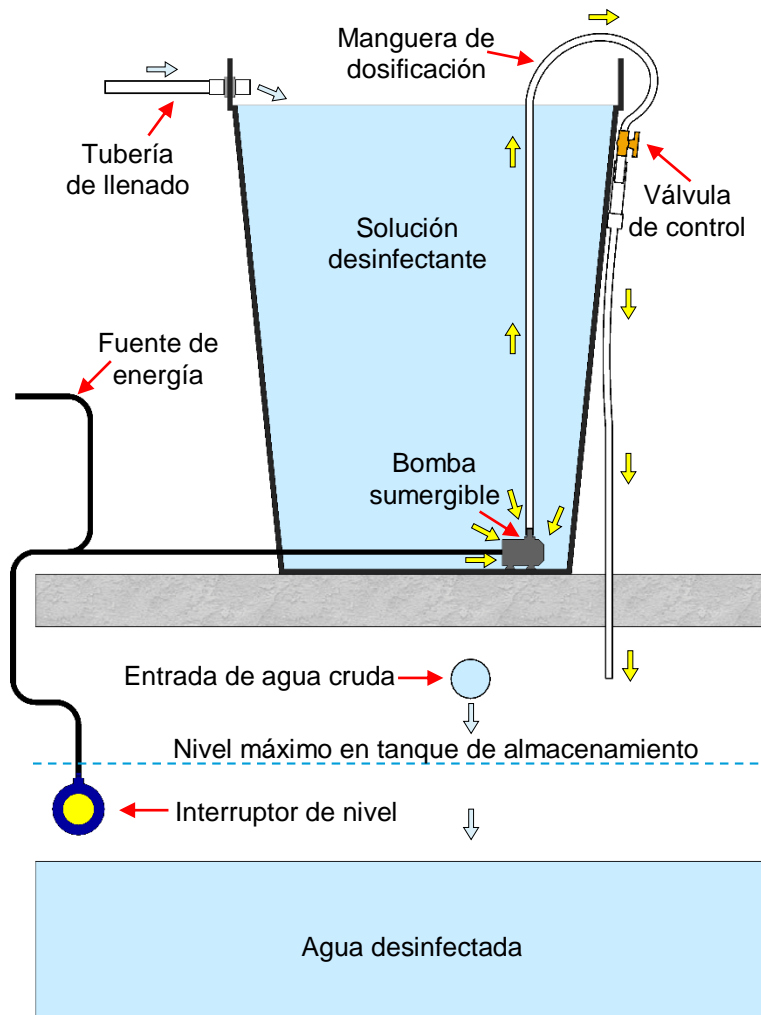


Figura 10. Bomba sumergible utilizada para la dosificación del cloro



diafragma más económica ronda los 250 € y por lo general son equipos importados altamente sensibles a las aguas crudas, especialmente a concentraciones altas de sólidos y turbiedades mayores a 3 NTU, así como también a los cambios bruscos de voltaje, su mantenimiento requiere de personal especializado, los repuestos son costosos y no están disponibles al instante puesto que se envían sobre pedido; por el contrario, las bombas sumergibles aceptan niveles de sólidos y turbiedad más altos, son fácilmente reemplazables y de un costo muchísimo menor cercano a los 9 €, son de fácil instalación, operación y mantenimiento.

Figura 11. Interruptor de nivel tipo flotador



En la siguiente sección se describe detalladamente el proceso de diseño del sistema de desinfección adaptado a las particularidades que se presentan en el Acueducto Veredal San Roque.

### 7.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN

Una vez terminado la selección de tecnología, se dio inicio a la fase de diseño del sistema de desinfección; para ello, el proceso abarcó la determinación de la demanda de cloro y la dosis optima que se aplicará con el objetivo de hacer un dimensionamiento de las estructuras, el cálculo de la solución desinfectante, el caudal de bombeo de dicha solución y la frecuencia de preparación.

**7.3.1 Curvas de demanda de cloro.** Para hacer un diseño adecuado del sistema de desinfección se debe tener en cuenta la demanda de cloro de diferentes muestras de agua de la quebrada El Cedro, con base en los criterios de selección anterior, en este caso se utilizó el hipoclorito de calcio para preparar la solución desinfectante que

Figura 12. Muestras de agua con diferentes concentraciones de cloro aplicado



se aplicaría a las muestras en diferentes



concentraciones con el objetivo de cuantificar el cloro residual haciendo uso del método de DPD (Fernández-Crehuet Navajas, Moreno Abril, & Pérez López, 2001).

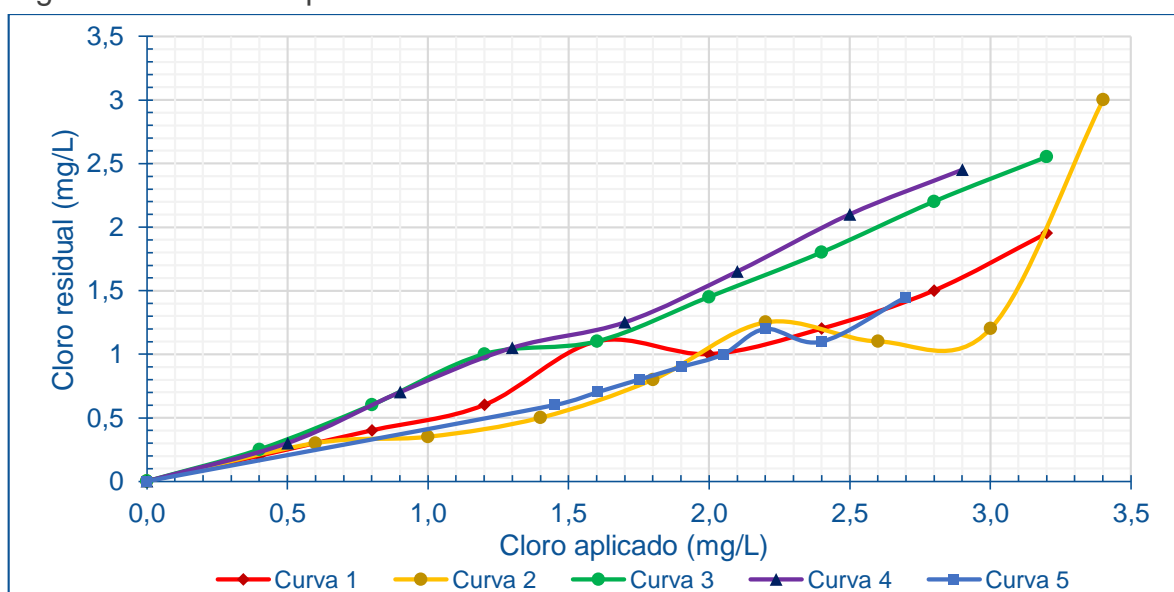
En la preparación de las muestras, se dispusieron balones aforados de 100 mL aplicándoles solución desinfectante con diferentes concentraciones (desde 0 mg/L hasta 3,4 mg/L) preparada a partir de una solución madre cuya concentración fue de 50 mg/L; posteriormente se llenaron con muestras de agua obtenidas del tanque de almacenamiento hasta el aforo, se dejaron durante 30 minutos en la oscuridad y finalmente se procedió a valorar el cloro residual en las muestras mediante titulación con el método de DPD (Figura 12). Los resultados para la elaboración de las curvas obtenidas experimentalmente en el laboratorio, se muestran en el Cuadro 12 y su representación gráfica en la Figura 13.

Cuadro 12. Datos experimentales correspondientes a las curvas de demanda de cloro del agua proveniente de la quebrada El Cedro

Curva	Cloro	Concentración (mg/L)									
		0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	-
1	Aplicado	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	-
	Residual	0,0	0,2	0,4	0,6	1,1	1,0	1,2	1,5	1,95	-
2	Aplicado	0,0	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	-
	Residual	0,0	0,3	0,35	0,5	0,8	1,25	1,1	1,2	3,0	-
3	Aplicado	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	-
	Residual	0,0	0,25	0,6	1,0	1,1	1,45	1,8	2,2	2,55	-
4	Aplicado	0,0	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	-	-
	Residual	0,0	0,3	0,7	1,05	1,25	1,65	2,1	2,45	-	-
5	Aplicado	0,0	1,45	1,6	1,75	1,9	2,05	2,2	2,4	2,7	3,0
	Residual	0,0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,1	1,45	1,85

\*Las concentraciones resaltadas en amarillo hacen referencia a las muestras que se utilizaron como “blanco”.

Figura 13. Curvas experimentales de demanda de cloro



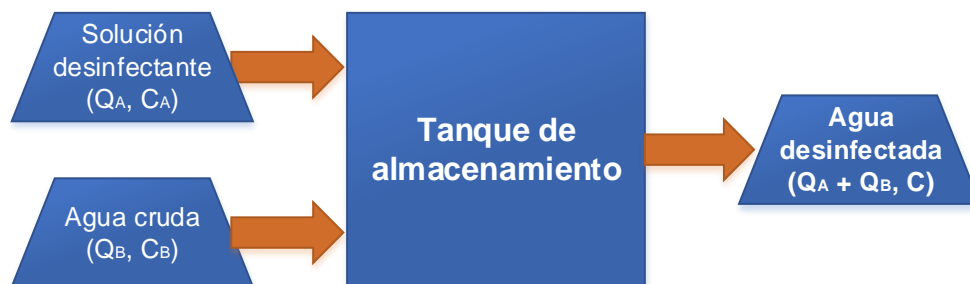
**7.3.2 Determinación de la dosis óptima.** Al evaluar las curvas de demanda de cloro mostradas en la Figura 13 se observa que dosis por debajo de 2,0 mg/L generan residuales de cloro combinado (cloraminas) y que el cloro residual libre y combinado se presenta a partir de valores entre 2,3 y 2,5 mg/L. Dado que en el presente proyecto se está intentando desinfectar aguas crudas (sin tratamiento alguno) y que bajo estas condiciones la posibilidad de formación de subproductos como los trihalometanos es alta, se ha considerado que la desinfección debe realizarse con cloraminas, las cuales presentan menos probabilidad de producción de subproductos de la desinfección y son mucho más estables que las formas de cloro libre (Ramírez Quirós, 2005), por lo tanto será en esta zona donde se seleccione la dosis a aplicar, en lugar de la zona en donde se presenta cloro libre.

Se considera que la dosis de 1,2 mg/L es la adecuada para iniciar con la desinfección del agua, ya que se generan residuales entre 0,4 y 1,0 mg/L, garantizando cumplir con la resolución 2115/2007 y evitando mayores costos al no utilizar dosis más altas.

**7.3.3 Preparación de la solución desinfectante.** La solución desinfectante se prepara partiendo de la concentración de cloro que se requiere aplicar para desinfectar el agua, en este caso 1,2 mg/L; adicionalmente, se decide usar como frecuencia de preparación un periodo de dos días y un volumen de 250 litros, se asume también que el tiempo promedio diario durante el cual se activa el sistema de bombeo es 4 horas (Velasco Velasco & Pechené Tunubalá, 2015); a continuación, se presentan los cálculos necesarios para la preparación.

En primera instancia se requiere calcular la concentración del cloro en los 250 litros de la solución desinfectante, para ello es necesario hacer un balance de masa mostrado en la Figura 14.

Figura 14. Balance de masa para la preparación de la solución desinfectante



Ecuación 3. Balance de masa del sistema

$$Q_A \times C_A + Q_B \times C_B = (Q_B + Q_A) \times C$$



Dónde,  $Q_A$  es el caudal de solución desinfectante que se va a aplicar, el cual se calcula con la Ecuación 4;  $C_A$  es la concentración de cloro en la solución desinfectante que se requiere calcular;  $Q_B$  hace referencia al valor promedio del caudal de bombeo que se muestra en el Cuadro 8;  $C_B$  es la concentración del cloro en el agua cruda, o sea el “blanco” en todas las curvas de cloro elaboradas en las cuales siempre fue 0 mg/L; y finalmente  $C$  hace referencia a la dosis optima de cloro que se discutió en la sección anterior.

Ecuación 4. Caudal de dosificación de la solución desinfectante

$$Q_A = \frac{\text{Volumen de alm.}}{\text{frecuencia de prep.} \times t. \text{ de bombeo}} = \frac{0,250 \text{ m}^3}{2 \text{ días} \times 4 \text{ h/día}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 8,68 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Una vez se halla el valor de  $Q_A$ , solamente queda  $C_A$  como incógnita; reemplazando valores en la Ecuación 3, se tiene:

Ecuación 5. Concentración de la solución desinfectante

$$C_A = \frac{(Q_B + Q_A) \times C - Q_B \times C_B}{Q_A}$$

$$C_A = \frac{(0,007070 + 8,68 \times 10^{-6}) \text{ m}^3/\text{s} \times 1,2 \text{ mg/L} + 0,007070 \text{ m}^3/\text{s} \times 0 \text{ mg/L}}{8,68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}} = 978,62 \text{ mg/L}$$

Conocido el valor de  $C_A$ , se procede a calcular la masa necesaria de hipoclorito de calcio granulado  $mc$  que se requiere para preparar dicha solución, teniendo en cuenta la pureza  $n$  del reactivo, tal y como se muestra en la Ecuación 6.

Ecuación 6. Masa de hipoclorito de calcio granulado

$$mc = \frac{C_A}{n} \times 250 \text{ L} = \frac{C_A}{0,7} \times 250 \text{ L} = \frac{978,62 \text{ mg/L}}{0,7} \times 250 \text{ L} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 349,5 \text{ g}$$

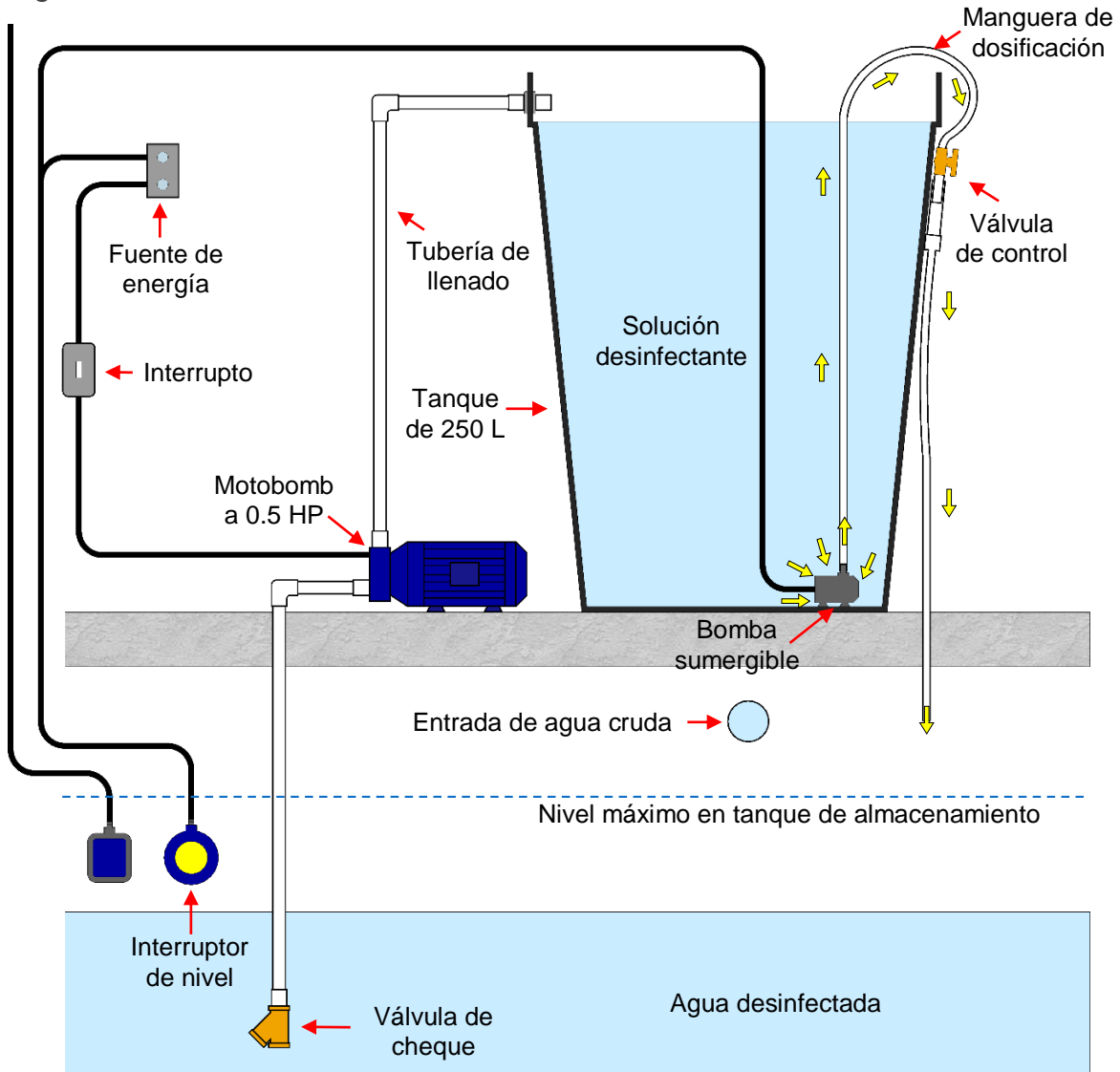
Debido a la complejidad que estos cálculos pueden presentar para el personal del Acueducto Veredal San Roque y con el objetivo de minimizar al máximo la probabilidad de errar en la dosificación, se optó por desarrollar un software que realice esta tarea y brinde la posibilidad de cambiar las diferentes variables como lo son la frecuencia de preparación de la solución desinfectante, el tiempo promedio diario de bombeo del sistema de abastecimiento, la concentración del hipoclorito de calcio, la dosis que se requiere aplicar al sistema, entre otros. En la sección 7.4 se describe en una forma más detallada la interfaz del programa y sus funcionalidades.

En resumen, suponiendo un funcionamiento diario de 4 horas del sistema de abastecimiento, para aplicar una dosis de 1,2 mg/L se requiere preparar cada dos

días, 250 litros de una solución desinfectante con una concentración de 979 mg/L, usando 350 g de hipoclorito de calcio granulado al 70%.

**7.3.4 Diseño final, operación y mantenimiento.** En la Figura 15 se muestra la configuración final del diseño del sistema dosificador que se va a instalar sobre el tanque de almacenamiento del Acueducto Veredal San Roque.

Figura 15. Diseño final del sistema de desinfección



Debido a que el sistema se instalará en la parte superior del tanque de almacenamiento, fue necesario considerar la adquisición de una motobomba que cumpla la función de llenar el tanque de 250 litros para preparar la solución

desinfectante. La conexión del interruptor de nivel se realizó de tal manera que cuando el nivel del agua en tanque de almacenamiento esté por debajo del máximo, se encienda el sistema de desinfección hasta que el sistema de abastecimiento nuevamente llene el tanque de almacenamiento hasta el máximo.

Para pesar el hipoclorito de calcio granulado, el operario contará con la ayuda de una balanza digital y la cantidad pesada se disolverá en un recipiente plástico de 10 litros antes de ser agregada al tanque de 250 litros para preparar la solución desinfectante, la cual se aplicará por medio de una manguera de nivel conectada a la bomba sumergible; por otra parte, el caudal de dosificación se calibrará mediante la apertura parcial de una válvula de control instalada sobre la pared externa del tanque de 250 litros.

El mantenimiento del sistema de desinfección es sumamente sencillo y solo requiere efectuar una limpieza periódica semanal del tanque de 250 litros, puesto que el hipoclorito de calcio granulado contiene sustancias insolubles que se precipitan y pueden afectar negativamente la vida útil de la bomba sumergible, la cual también debe limpiarse y verificar el estado de las partes expuestas a la corrosión.

## **7.4 DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA EL CONTROL Y REGISTRO DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN**

Se utilizó un lenguaje de programación orientado a objetos y con ayuda del software Visual Basic se desarrolló una interfaz en la que se aplican todos los cálculos mencionados en las secciones anteriores, para obtener con precisión la cantidad apropiada de desinfectante que se debe aplicar en el sistema de abastecimiento y facilitar su operación; además, el software ofrece la posibilidad de realizar variaciones en cuanto a la frecuencia de preparación de la solución desinfectante, la cantidad de agua que los usuarios demandan diariamente, la concentración final de desinfectante que se desea aplicar y el tipo de desinfección que se considere en el momento (controlada o inmediata). En las secciones siguientes se presenta de forma breve las partes de la interfaz del programa y su funcionamiento.

**7.4.1 Iniciando el software.** El programa tiene un solo aplicativo llamado **Cl<sub>2</sub>App** que se abre al ejecutar un doble clic sobre este, desplegando una ventana inicial (Figura 16) en la cual se aprecia un campo para ingresar la identidad de un usuario registrado, los botones de “Nuevo usuario”, “Entrar” y el menú “Archivo”.

Cuando se abre el programa, automáticamente se crea en la carpeta donde se encuentra el aplicativo, la subcarpeta “Almacenamiento de datos” que contiene tres archivos de texto (\*.txt) llamados “Caudales”, “Dosis” y “ListaUsuarios”; estos

archivos son los que almacenarán los datos que el usuario registre cada vez que utilice el programa.

Para disponer de las funciones del software, se debe ingresar la Id. de un usuario registrado y posteriormente hacer clic en el botón “Entrar”; si el usuario no está registrado en el sistema, debe registrarse como un nuevo usuario.

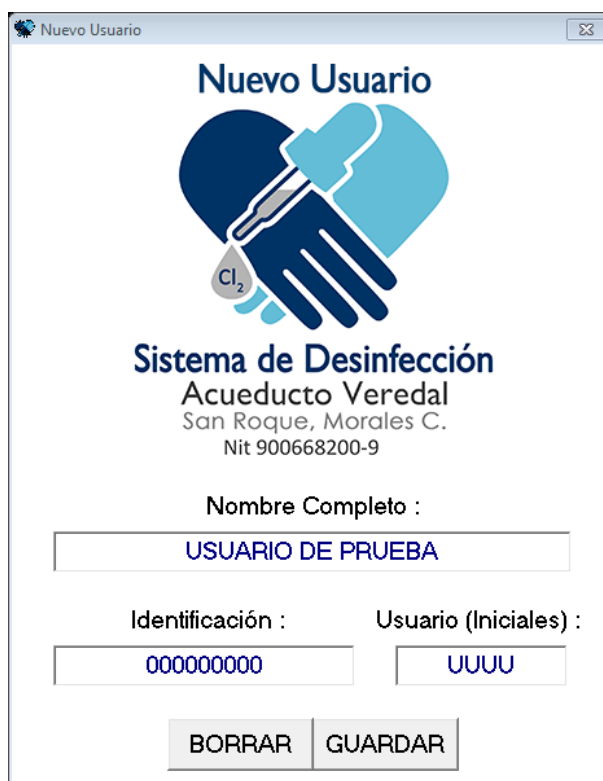
**7.4.2 Registrar un nuevo usuario.** Si es la primera vez que ingresa a la aplicación, es necesario crear un usuario; para ello, en la ventana inicial se debe hacer clic sobre el botón “Nuevo” o pulsar las teclas “Ctrl + N”, esta acción abrirá la ventana “Nuevo Usuario” (Figura 17) en la cual se agregan datos correspondientes al nombre del nuevo usuario (se recomienda escribir el nombre completo de la persona que desea utilizar el programa), el número de identificación (cédula de ciudadanía) y un código de usuario (identidad de acceso al programa conformada por cuatro caracteres tipo letra). Se recomienda que el campo relacionado con la identidad del usuario, tome las iniciales del nombre para facilitar la relación al momento de revisar los datos registrados.

Posteriormente al hacer clic “GUARDAR” aparece una ventana de confirmación de datos en la que se muestra un resumen de la información que se desea registrar para el nuevo usuario; al confirmar los datos, se guardan y automáticamente el programa vuelve a la ventana inicial mostrando la identidad del último usuario guardado; en este momento el usuario ya puede ingresar al sistema.

Figura 16. Inicio de Cl<sub>2</sub>App



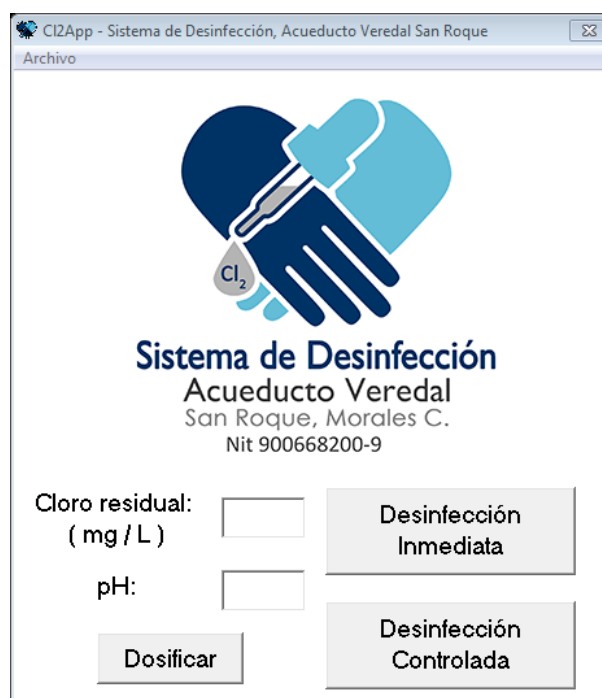
Figura 17. Ventana “Nuevo Usuario”



**7.4.3 Funciones del software.** La función principal del software es calcular la masa de cloro y el caudal de dosificación necesarios para preparar y aplicar la solución desinfectante al sistema de abastecimiento; además, se suministran las herramientas básicas para ajustar los cálculos, teniendo en cuenta parámetros como el caudal de suministro, caudal de dosificación, frecuencia de preparación de la solución desinfectante, tiempo de bombeo diario, concentración de cloro granulado y dosis de cloro.

Se consideran dos tipos de desinfección denominadas **Desinfección Inmediata** y **Desinfección Controlada**; cuyo uso depende principalmente de los niveles de cloro residual en el agua del tanque de almacenamiento. Una vez el usuario ingresa a la aplicación con su id. aparece la ventana “Sistema de Desinfección” (Figura 18) que contiene dos casillas para el ingreso de datos (cloro residual y pH medidos en el tanque de almacenamiento), tres botones de acción (Dosificar, Desinfección Inmediata y Desinfección Controlada) y el menú “Archivo”.

Figura 18. Ventana “Sistema de Desinfección”



**7.4.3.1 Dosificar.** Para usar este botón, es necesario ingresar un valor del cloro residual y pH obtenido a partir del test colorimétrico aplicado a una muestra de agua tomada en el tanque de almacenamiento. Se debe tener en cuenta que los valores ingresados son numéricos y el separador decimal del programa es el punto “.”. Cuando el valor del cloro residual ingresado está por debajo de 1 mg/L, al hacer clic sobre el botón “Dosificar” se inactiva el acceso a la “Desinfección Controlada”; de forma contraria, cuando el valor del cloro residual ingresado es igual o superior a 1 mg/L, se inactiva el acceso a la “Desinfección Inmediata”; esto le permite al usuario saber qué tipo de desinfección utilizar dependiendo del nivel de cloro residual que se tenga en el momento.

**7.4.3.2 Desinfección Inmediata.** Este tipo de desinfección se usa cuando el nivel del cloro en el agua que se envía a los usuarios no garantiza una reducción confiable del riesgo microbiológico (cloro residual por debajo de 1 mg/L) y por tanto es

necesario elevar la concentración del agente desinfectante de forma inmediata usando el caudal de bombeo máximo en la dosificación; lo ideal es que solo se use en pocos casos principalmente cuando se hacen reparaciones y es necesario poner en marcha nuevamente el sistema de desinfección. En esta ventana (Figura 19) se aprecian tres elementos que el usuario debe suministrar antes de realizar el cálculo: dosis a aplicar, altura del agua en el tanque de almacenamiento (30 m<sup>3</sup>) y concentración del cloro. Los valores por defecto de estos parámetros son 1.8 mg/L, 160 cm y 70% respectivamente y se debe tener la precaución de ajustarlos siempre y cuando sea necesario. Finalmente, al hacer clic en “Calcular” se obtiene el valor de los gramos de cloro necesarios para la preparación de la solución desinfectante.

Figura 19. Desinfección Inmediata

Desinfección Inmediata

**Desinfección Inmediata**

Dosis a aplicar (mg/L): 1.8

Altura del agua en el tanque (cm): 160

Concentración de cloro (%): 70

Calcular Borrar

Masa de cloro (gramos): 77

Atrás Guardar

**7.4.3.3 Desinfección Controlada.** Al contrario de la desinfección inmediata, este tipo de desinfección se usa cuando el nivel del cloro residual en el agua que se envía a los usuarios está por encima de 1 mg/L garantizando una reducción eficiente del riesgo microbiológico; este modo de desinfección es el que debe estar en funcionamiento regularmente.

En esta ventana (Figura 20) se aprecian cuatro elementos que el usuario debe suministrar antes de realizar el cálculo: dosis a aplicar, frecuencia de preparación, tiempo de bombeo y concentración del cloro. Los valores por defecto de estos parámetros son 1.8 mg/L, 2 días, 4 horas/día y 70 % respectivamente, teniendo la precaución de ajustarlos siempre y cuando sea necesario. Posteriormente al hacer clic en el

Figura 20. Desinfección Controlada

Desinfección Controlada

**Desinfección Controlada**

Dosis a aplicar (mg/L): 1.8

Frecuencia de preparación (días): 2

Tiempo de bombeo (horas/día): 4

Concentración del cloro (%): 70

Calcular Borrar

Masa de cloro (gramos): 524

Caudal solución desinfectante (mL/min): 521

Concentración solución desinf. (mg/L): 1467

Atrás Guardar



botón “Calcular” se obtiene el valor de la masa de cloro que se debe utilizar en la preparación de la solución desinfectante, el caudal con el cual debe ser aplicada al tanque de almacenamiento y su concentración. Los criterios para cambiar la frecuencia de preparación y el tiempo de bombeo se centran en el consumo de los usuarios, que en época de invierno aumenta considerablemente en relación a la época de verano y por tal razón la cantidad de solución desinfectante aumenta de forma proporcional; también se debe tener en cuenta que con el pasar del tiempo la motobomba instalada en la bocatoma sufre un desgaste considerable y esto hace que su eficiencia disminuya considerablemente pasando de 7,07 L/s hasta 5,5 L/s, siendo necesario más tiempo de bombeo para suplir la cantidad de agua demandada.

**7.4.3.4 Calibración del caudal de bombeo.** Cuando se hace clic sobre el submenú “Calibración del caudal de bombeo” o se pulsa la tecla “F5” en la ventana “Sistema de Desinfección” el programa abre la ventana “Calibración del caudal de bombeo”; en esta ventana se muestra el ultimo caudal de bombeo configurado por el usuario cuyo valor será de 7.070 L/s si no hay datos guardados, luego se encuentra una casilla para insertar un “Número de mediciones” y hace referencia al número de datos que se ingresarán al sistema para realizar la calibración, luego se aprecia el botón “Calibrar Caudal” seguido de una casilla amplia en donde se muestran los “Caudales obtenidos de las mediciones” y los botones “Atrás”, “Guardar” y “Limpiar”.

**7.4.3.5 Guardar datos.** Para guardar los datos de la desinfección inmediata, desinfección controlada y calibración del caudal de bombeo, una vez se finalice cada proceso se activará el botón “Guardar” y al hacerle clic aparecerá una ventana de confirmación con un resumen de los datos que se han procesado; si al revisar los datos no se encuentran errores, entonces se procede a aceptar el procedimiento, la información quedará almacenada automáticamente en los archivos de texto ya mencionados y se abrirá la ventana “Sistema de desinfección” (Figura 18).

Figura 21. Calibración del caudal de bombeo

Calibración del caudal de bombeo

### Calibración del Caudal de Bombeo

Sistema de Desinfección  
Acueducto Veredal  
San Roque, Morales C.  
Nit 900668200-9

Caudal de bombeo (L/s):

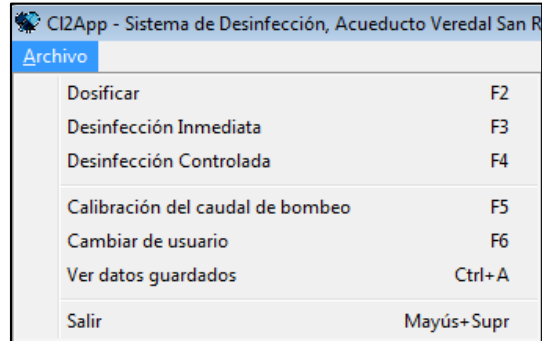
Número de mediciones:

Caudales obtenidos de las mediciones: (L/s)

7.4.3.6 Menú Archivo. Este menú (Figura 22) contiene los siguientes submenús:

- ✓ Dosificar
- ✓ Desinfección inmediata
- ✓ Desinfección controlada
- ✓ Calibración del caudal de bombeo
- ✓ Cambiar de usuario
- ✓ Ver datos guardados

Figura 22. Menú “Archivo” de la ventana “Sistema de Desinfección”



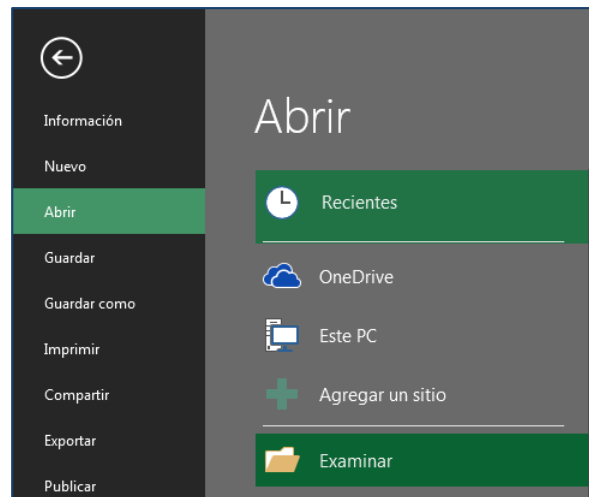
7.4.3.6.1 Cambiar de usuario. Cuando se hace clic sobre el submenú “Cambiar de usuario” o se pulsa la tecla “F6” en la ventana “Sistema de Desinfección” el programa abre una ventana en la que muestra el usuario actual y se pregunta si efectivamente se quiere cambiar de usuario sin salir del programa.

7.4.3.6.2 Ver datos guardados. Cuando se hace clic sobre el submenú “Ver datos guardados” o se pulsa las teclas “Ctrl + A” en la ventana “Sistema de Desinfección” el programa abre la carpeta en donde se encuentran los archivos \*.txt que guardan los registros de los usuarios.

Se recomienda utilizar una hoja de cálculo de Microsoft Excel para procesar los datos almacenados en los archivos de texto de la siguiente manera:

- ✓ Abra Microsoft Excel.
- ✓ Haga clic en el menú Archivo, Abrir y Examinar (Figura 23).

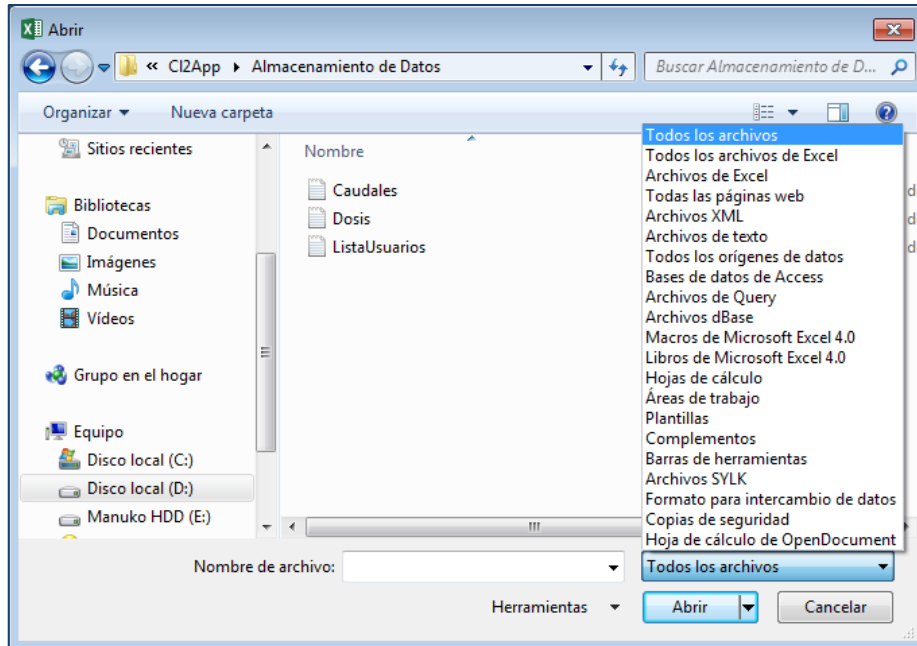
Figura 23. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 1





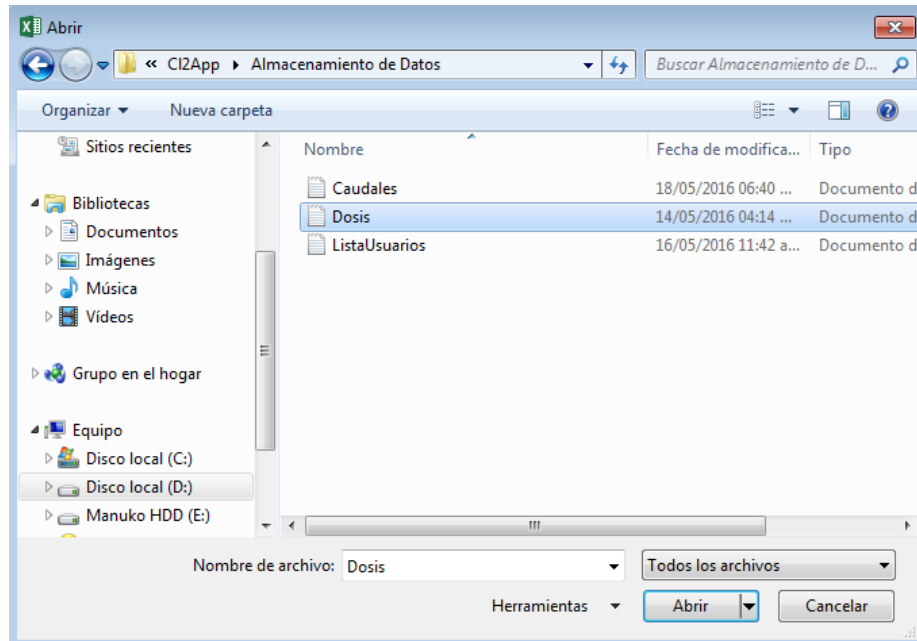
- ✓ Seleccione la carpeta que contiene los archivos y en la parte inferior derecha seleccione Todos los archivos (Figura 24).

Figura 24. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 2



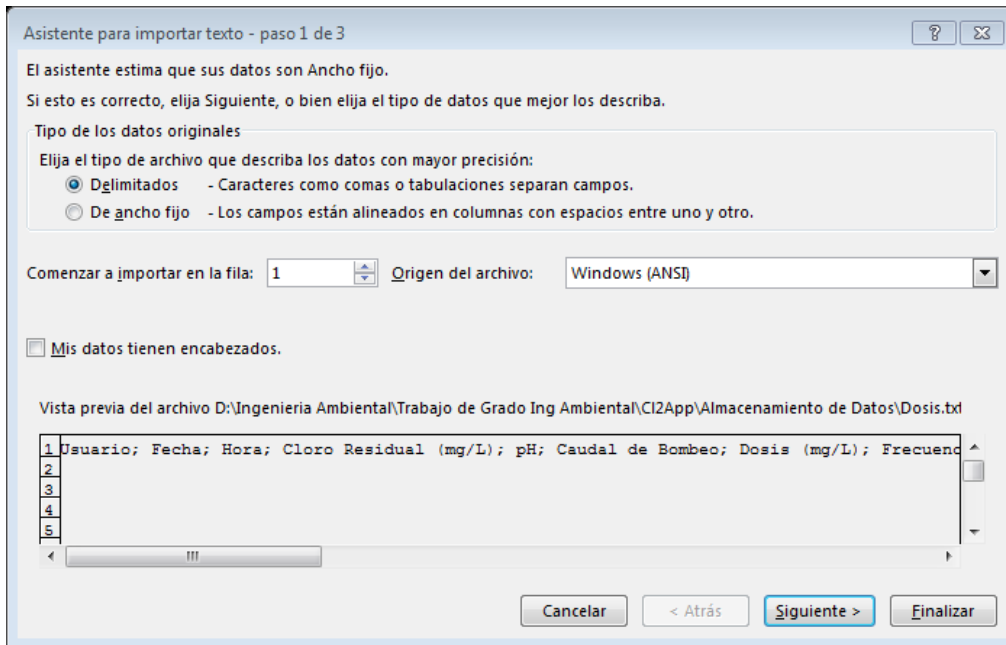
- ✓ Seleccione el archivo de su interés y haga clic en abrir (Figura 25).

Figura 25. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 3



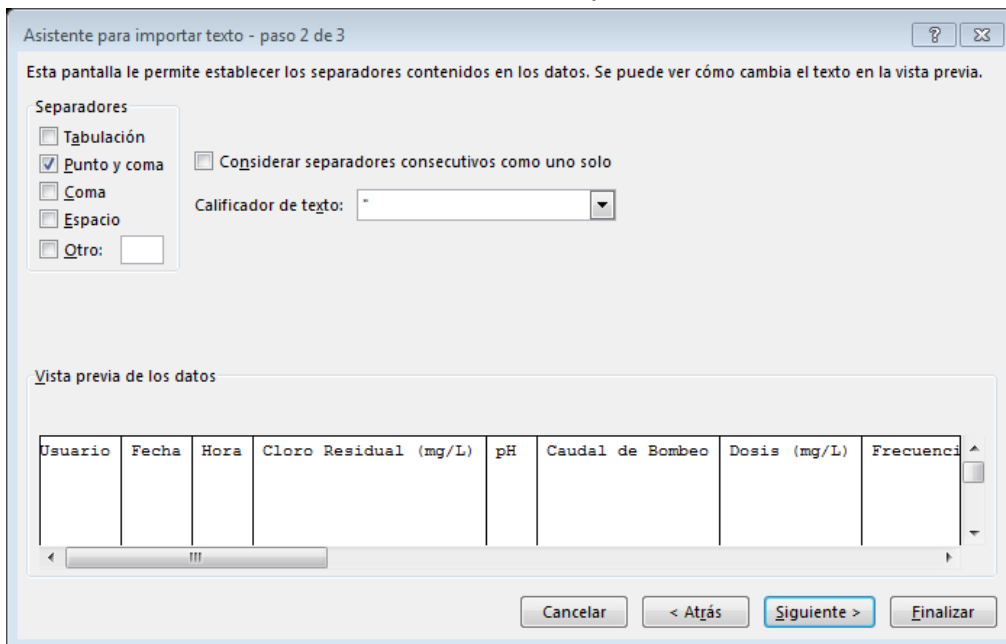
- ✓ En la ventana emergente, seleccione la opción “Delimitados” y haga clic en siguiente (Figura 26).

Figura 26. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 4



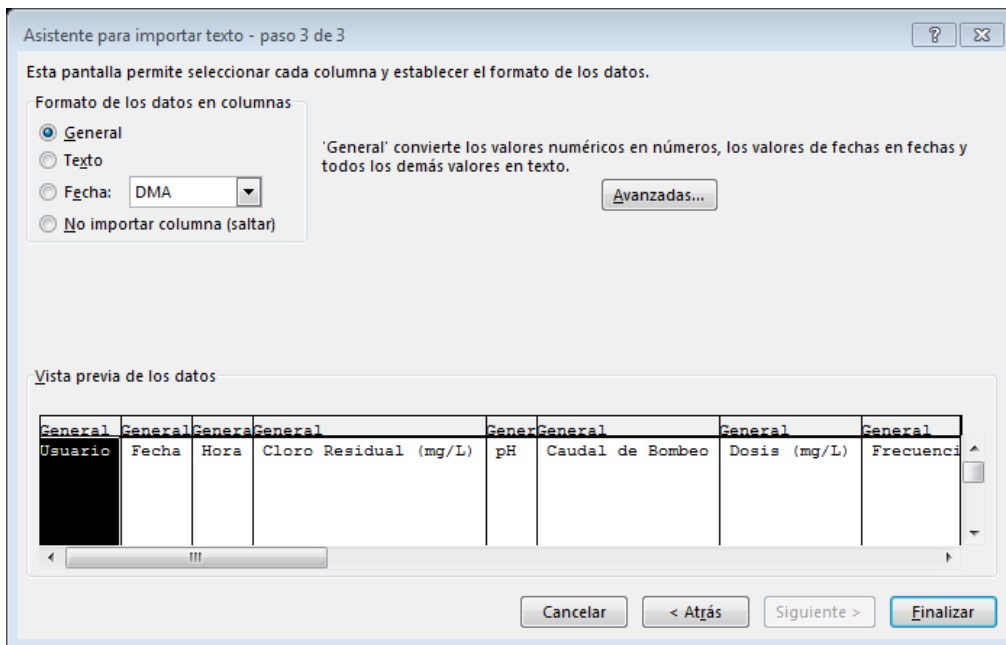
- ✓ Marque únicamente la casilla “Punto y coma” y haga clic en siguiente (Figura 27).

Figura 27. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 5



✓ Finalmente marque la opción “General” y haga clic en “Finalizar” (Figura 28).

Figura 28. Visualizar datos en Microsoft Excel, paso 6



**7.4.4 Salir del programa.** Para salir del programa hay tres formas de hacerlo, la primera es hacer clic sobre la “X” ubicada en la parte superior derecha, la segunda es abrir el menú archivo y hacer clic en la opción salir y la tercera es accionar conjuntamente las teclas “Shift” + “Supr”.

## 7.5 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN

La construcción del sistema se realizó en dos jornadas; en la primera, se procedió a realizar las conexiones hidráulicas del tanque de 250 L, la motobomba de ½ HP y la bomba sumergible, se conectaron los circuitos eléctricos y se realizó la instalación del interruptor de nivel en el tanque de almacenamiento; en la segunda, se procedió a realizar las pruebas de arranque del sistema, principalmente verificación, corrección de fugas y ensayos de calibración del caudal de la solución desinfectante usando una probeta para la medición del volumen y un cronometro para la medición del tiempo.

Figura 29. Interruptores de nivel en el tanque de almacenamiento



Figura 30. Primera prueba de fugas del sistema de desinfección



**7.5.1 Materiales y costos.** En el Cuadro 13 se presentan los materiales utilizados en la construcción del sistema de desinfección, sus costos unitarios y su costo total

Es de resaltar que independientemente del sistema dosificador seleccionado, había que considerar la adquisición de equipos adicionales (motobomba de 0.5 HP y balanza digital); por otra parte, se debe tener en cuenta que el tambor de cloro de 40 Kg garantiza un funcionamiento promedio del sistema de aproximadamente seis meses.

En conclusión, restando los valores de estos equipos y asumiendo al cloro como un costo variable, se podría afirmar que los costos fijos del sistema de desinfección fueron de apenas 304.500 COP.

Cuadro 13. Materiales y costos del sistema de desinfección

Materiales	Cantidad	Costo (COP)	
		Unitario	Total
Tanque Acuaviva de 250 L	1	96.000	96.000
Juego de válvula y flotador para tanque	1	13.000	13.000
Motobomba de 0.5 HP	1	80.000	80.000
Bomba sumergible NPSHd = 1 m	1	25.000	25.000
Manguera de ½" (metros)	6	600	3.600
Tubo de PVC de ½" (metros)	4	2.300	9.200
Tubo de PVC de 1" (metros)	4	3.000	12.000
Codo PVC ½"	4	600	2.400
Codo PVC 1"	1	900	900
Tee PVC ½"	1	700	700
Tapón roscado PVC ½"	1	800	800
Adaptador macho PVC ½"	4	600	2.400
Adaptador macho PVC 1"	2	900	1.800
Unión PVC ½"	3	500	1.500
Buje PVC 1" a ½"	2	1.000	2.000
Adaptador macho para manguera ½"	2	800	1.600
Grifo plástico de ½"	1	2.300	2.300
Válvula de cheque de ½"	1	5.500	5.500
Soldadura PVC 20 cm <sup>3</sup>	1	7.900	7.900
Cinta teflón	2	500	1.000
<b>Cloro granulado (70% de pureza) (Kg)</b>	<b>40</b>	<b>6.750</b>	<b>270.000</b>
Balanza digital (máx. 5000 g; precisión ± 1 g)	1	110.000	110.000
Probeta plástica de 1000 mL	1	17.600	17.600
Recipiente plástico de 2 L	1	3.400	3.400
Cuchara medidora plástica	1	1.300	1.300
Flotador electromecánico	1	31.000	31.000
Cable dúplex calibre 12	10	2.800	28.000
Toma corriente	2	2.500	5.000
Enchufe	2	1.800	3.600
Protector de voltaje	1	25.000	25.000
<b>TOTAL</b>		<b>445.050</b>	<b>764.500</b>

## 7.6 ARRANQUE DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN

Antes de poner en marcha el sistema de desinfección, se realizó una desinfección inicial en el tanque de almacenamiento y la red de distribución, con el objetivo de mitigar la biopelícula que se encuentra adherida a las paredes de la tubería y del tanque de almacenamiento, para ello se prepararon 30 metros cúbicos de una solución desinfectante concentrada a 50 ppm con hipoclorito de calcio granulado al 70% la cual se dejó correr sobre la red de distribución, y con un volumen de 250 L se lavaron las paredes del tanque de almacenamiento con cepillos de cerdas abrasivas.



La desinfección inicial tuvo como resultado algunos taponamientos de grifos en las zonas más críticas a causa del desprendimiento del material biológico de la tubería, por esta razón fue necesario realizar un mantenimiento en estas zonas y desinfectar nuevamente la red de distribución con una solución menos concentrada a 20 ppm. Al finalizar de este proceso, se puso en marcha el sistema con una dosis inicial de 1,2 mg/L para lo cual se adicionaron al tanque de 250 L, 350 g de hipoclorito de calcio al 70% y el caudal de dosificación de la solución desinfectante se ajustó a razón de 520 mL/min.

Figura 31. Arranque del sistema de desinfección



## 7.7 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN

En esta etapa se evaluaron diferentes aspectos del sistema de desinfección, principalmente la reducción del riesgo microbiológico del agua suministrada a los usuarios; de igual forma se evaluaron aspectos relacionados con la operación y el mantenimiento de las unidades que componen el sistema, así como también la vulnerabilidad que este pudiese presentar ante posibles eventualidades. A continuación, se describe con más detalle cada uno de estos aspectos.

**7.7.1 Reducción del riesgo microbiológico.** Para evaluar la reducción del riesgo microbiológico que se suponía con la implementación del sistema de desinfección, 30 minutos después de la dosificación se tomaron muestras de agua en el embalse, tanque de almacenamiento y en tres puntos de la red de distribución ubicados estratégicamente.

En cada punto, se realizó un análisis de coliformes totales, coliformes fecales, cloro residual y pH; por los altos costos que representaba para el Acueducto Veredal San Roque, solo se evaluó una muestra por semana para la determinación de coliformes y se hicieron lecturas triplicadas únicamente para los parámetros de cloro residual y pH.

En el Cuadro 14 se muestran los resultados obtenidos de las muestras tomadas durante el primer mes de evaluación, aplicando sobre el sistema de abastecimiento una dosis de 1,2 mg/L.

Cuadro 14. Resultados del análisis de las muestras con una dosis de 1,2 mg/L

Parámetro	*Punto	Tiempo (semanas)				Máx.	Min.	Media
		1	2	3	4			
<b>Coliformes Totales</b> (UFC/100mL)	E	540	560	520	640	640	520	<b>565,00</b>
	TA	0	0	0	0	0	0	0,00
	R1	0	0	0	0	0	0	0,00
	R2	40	290	130	70	290	0	<b>132,50</b>
	R3	0	0	0	0	0	0	0,00
<b>Coliformes Fecales</b> (UFC/100mL)	E	120	100	90	130	130	90	<b>110,00</b>
	TA	0	0	0	0	0	0	0,00
	R1	0	0	0	0	0	0	0,00
	R2	0	0	0	0	0	0	0,00
	R3	0	0	0	0	0	0	0,00
<b>Cloro Residual</b> (mg/L)	E	0	0	0	0	0	0	0,00
	TA	1,0	1,0	0,8	1,0	1	0,8	0,95
	R1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,48
	R2	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	<b>0,08</b>
	R3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2	0,30
<b>pH</b>	E	6,8	6,7	6,9	7	7	6,7	6,85
	TA	6,6	6,6	6,6	6,8	6,8	6,6	6,65
	R1	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,5	6,58
	R2	6,5	6,5	6,6	6,8	6,8	6,5	6,60
	R3	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,5	6,58

\*E: Embalse; TA: tanque de almacenamiento; R1: punto 1 sobre la red de distribución; R2: punto 2 sobre la red de distribución; R3: punto 3 sobre la red de distribución.

El primer punto sobre la red de distribución, es una vivienda localizada a poco más de trescientos metros al occidente del tanque de almacenamiento, el agua que llega a esta vivienda es derivada del ramal que abastece la zona oeste de la comunidad y aproximadamente se encuentra en un punto medio de este. El segundo punto, es una vivienda ubicada aproximadamente a 500 metros al sur del tanque de almacenamiento que se abastece de un ramal secundario derivado del ramal principal que transporta el agua a las zonas sur y oriental de la comunidad. Finalmente, al igual que los anteriores, el tercer punto es una vivienda ubicada aproximadamente a 600 metros al oriente del tanque de almacenamiento, abastecida directamente por el ramal principal de la zona oriental.

Como era de suponerse, las muestras analizadas provenientes del embalse presentaron niveles de coliformes propios de un agua sin tratamiento con un promedio de 565 UFC/100mL para coliformes totales y 110 UFC/100mL para coliformes fecales. En los lugares sobre los cuales se suponía una desinfección del



agua por la acción del cloro, se encontraron resultados positivos de coliformes totales solamente en el punto R2 con un promedio de 122,5 UFC/100 mL.

Al analizar los resultados relacionados con la concentración de cloro residual, se observa que hay un consumo pequeño en el tanque de almacenamiento, por el contrario, el consumo es muy grande en los puntos R1, R2 y R3, lo cual se atribuye a que probablemente aún existe biopelícula adherida a las paredes de la tubería.

Figura 32. Análisis colorimétrico de cloro y pH en una muestra originaria de la red de distribución.

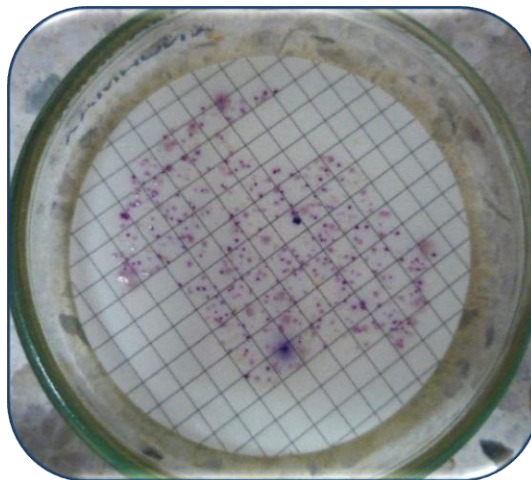


El punto R2 presenta las condiciones más críticas ya que es el único que no cumple con el nivel mínimo de cloro residual en la red de distribución que exige la normatividad colombiana ( $> 0,3$  mg/L), y a pesar de aplicar una dosis de  $1,2$  mg/L, el cloro residual promedio es de apenas **0,08 mg/L**; sin embargo, al comparar este valor con el promedio de cloro residual en el punto R3 ( $0,3$  mg/L) el cual se encuentra ubicado a una distancia mayor y se abastece de agua del mismo ramal, se puede suponer la posibilidad de que exista algún tipo de contaminación adicional en ese tramo.

Se observa que el punto más cercano al tanque de almacenamiento es el que mejores niveles de cloro residual presenta con un promedio de  $0,48$  mg/L, no obstante, esta concentración se considera relativamente baja para el agua que se suministra a los usuarios porque al no recibir ningún tipo de tratamiento previo a la cloración, se supone la existencia de gran cantidad de patógenos.

En cuanto al pH, en general se observa una disminución leve en los puntos sobre los cuales se aplicó la desinfección en relación a las condiciones naturales del agua proveniente del estanque; sin

Figura 33. Resultado positivo del análisis de coliformes totales en una muestra agua proveniente del embalse.



embargo, las condiciones ligeramente ácidas del agua favorecen la presencia de la especie con mayor poder bactericida de acuerdo a lo mostrado en la Figura 3, es decir el HOCl, potenciando en gran medida el proceso de desinfección.

Con base en los resultados mostrados en el Cuadro 14, se decide incrementar la dosis para las siguientes 8 semanas, pasando de 1,2 mg/L a 1,8 mg/L con el objetivo de eliminar la presencia de coliformes totales en el punto R2 y aumentar los niveles de cloro residual en todos los puntos de la red de distribución. Los cálculos para la preparación de la solución desinfectante arrojaron que se debían agregar 524 g de hipoclorito de calcio granulado a 250 litros de agua, que posteriormente serían dosificados al sistema de abastecimiento a razón de 520 mL/min.

Con base en los resultados mostrados en el Cuadro 15, al igual que en las cuatro primeras semanas, las muestras provenientes del embalse siguieron presentando resultados positivos a los ensayos de coliformes totales y fecales, con un gran incremento en las semanas 7 y 8 de los coliformes totales, pasando de 510 UFC/100 mL en la semana 6 a 7000 y 5100 UFC/100 mL respectivamente; este incremento se atribuye a que en esas semanas se presentaron muchas lluvias en la zona de influencia de la quebrada El Cedro y probablemente la escorrentía superficial y el arrastre de diferentes materiales fueron los que ocasionaron dicho incremento, por otra parte, los niveles de coliformes fecales se mantuvieron en rangos similares a los iniciales con un valor máximo de 140 UFC/100 mL.

La aparición de coliformes totales en el punto R2 se disminuyó considerablemente pasando de un promedio de 132,5 UFC/100 mL para las cuatro primeras semanas a tan solo 7,5 UFC/100 mL para las cuatro semanas siguientes, presentándose en la semana cinco el único resultado positivo con un valor de 30 UFC/100 mL, lo cual refleja que el aumento de la dosis fue efectivo en la desinfección.

Como era de esperarse, el incremento en la dosis causó un incremento en los niveles de cloro residual en todos los puntos, cumpliendo con lo estipulado en la Resolución 2115 de 2007 en todos los puntos a partir de la semana 6 y presentándose la concentración promedio más baja en el punto R2 con 0,35 mg/L.

Figura 34. Resultado negativo del análisis de coliformes fecales en una muestra agua proveniente del tanque de almacenamiento



Cuadro 15. Resultados del análisis de las muestras con una dosis de 1,8 mg/L

Parámetro	*Punto	Tiempo (semanas)								Máx.	Min.	Media
		5	6	7	8	9	10	11	12			
Coliformes Totales (UFC/100mL)	E	680	510	7000	5100	x	x	x	x	7000	510	3322,5
	TA	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0,00
	R1	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0,00
	R2	30	0	0	0	x	x	x	x	30	0	7,50
	R3	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0,00
Coliformes Fecales (UFC/100mL)	E	140	110	120	100	x	x	x	x	140	100	117,5
	TA	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0
	R1	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0
	R2	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0
	R3	0	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0
Cloro Residual (mg/L)	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
	TA	1,2	1,3	1,5	1,5	1,5	1,4	1,6	1,5	1,6	1,2	1,44
	R1	0,7	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	0,9	0,5	0,74
	R2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,4	0,5	0,2	0,35
	R3	0,5	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	0,6	0,8	0,4	0,60
pH	E	7	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	7	6,9	6,93
	TA	6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,7	6,9	6,9	6,7	6,86
	R1	6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	6,8	6,7	6,9	6,9	6,7	6,85
	R2	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,9	6,9	6,7	6,79
	R3	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,8	6,8	6,7	6,79

\*E: Embalse; TA: tanque de almacenamiento; R1: punto 1 sobre la red de distribución; R2: punto 2 sobre la red de distribución; R3: punto 3 sobre la red de distribución

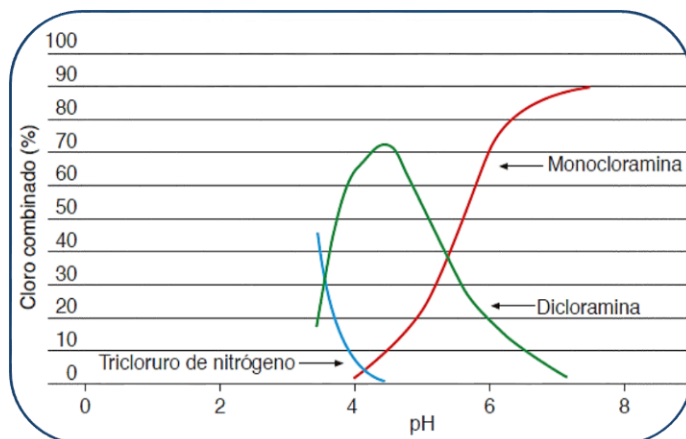
A pesar de que a partir de la semana 6 no se presentaron resultados positivos de coliformes totales y fecales todos los puntos a excepción del embalse, y teniendo en cuenta que el punto R2 continuó con la tendencia de presentar la concentración de cloro residual más baja, se puede inferir que efectivamente en ese punto existe una contaminación exterior que incrementa significativamente la demanda de cloro residual, posiblemente una avería en la estructura de la tubería, una unión deficiente, una fuga o una conexión errada pueden ser las causantes de este problema.

Comparando los resultados obtenidos presentados en el Cuadro 14 y Cuadro 15 para las ocho primeras semanas, se observa que cuando el cloro residual en cualquier punto fue igual o superior a **0,3 mg/L** no hubo rastro de coliformes totales ni fecales, lo cual hace pensar que **si se mantiene dicha concentración** en la red de distribución **se garantizará una reducción efectiva del riesgo microbiológico** del agua que se suministra a los usuarios.

En cuanto al pH, la naturaleza del agua siguió con la tendencia de presentar entornos ligeramente ácidos, y como se dijo anteriormente esto favorece la presencia de HOCl; por otra parte, de acuerdo a la Figura 13, se puede presagiar que la dosis de 1,8 mg/L todavía se encuentra en una zona en la que probablemente

prima el cloro residual combinado, y en ese sentido, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 35, las monocloraminas serían la especie más representativa, favoreciendo a que las características organolépticas del agua no se vean fuertemente afectadas, al contrario de lo que sucedería si las dicloraminas o el tricloruro de nitrógeno primaran en el agua (Ramírez Quirós, Desinfección del agua con cloro y cloraminas, 2005).

Figura 35. Especies de cloraminas en función del pH



Fuente: Tomado de RAMÍREZ QUIRÓS, Desinfección del agua con cloro y cloraminas, 2005.

En resumen, la evaluación muestra que los ajustes realizados a la dosis de desinfectante tuvieron efecto a partir de la semana 6, cumpliendo efectivamente con el objetivo de reducir el riesgo microbiológico al que estaban expuestos los usuarios y garantizando los niveles de cloro residual que exige la normatividad colombiana en la red de distribución.

**7.7.2 Operación y mantenimiento.** En el aspecto operativo, en ningún caso se tuvieron inconvenientes con las acciones de preparación de la solución desinfectante y calibración del caudal de dosificación, resaltando también que el software ayudó en gran medida a facilitar los cálculos y llevar un control y registro de las labores realizadas.

Las calibraciones del caudal de dosificación se realizaron pocas veces, ya que la bomba sumergible siempre dosifica el mismo caudal y este se ajusta con la apertura parcial de la válvula de control, la cual no fue necesario mover sino hasta que se incrementó la dosis en la semana 5; del resto, simplemente se procedió a verificar que el caudal de dosificación fuera igual al calculado, a partir del

Figura 36. Sedimentos en el tanque de 250 litros al final de un ciclo de desinfección





promedio de tres mediciones de volumen/tiempo aceptando un error máximo del 5%.

En cuanto al mantenimiento del sistema, se observó que cada vez que se terminaba la solución desinfectante, se depositaban sedimentos en el tanque de 250 litros provenientes de las impurezas del hipoclorito de calcio granulado, por tal razón fue necesario disolver primero el hipoclorito de calcio granulado en un balde de 10 litros, dejándolo reposar por 10 minutos y posteriormente adicionándolo al sistema de desinfección con la precaución de no verter las partículas sedimentadas en el fondo del balde; esta acción no redujo la concentración de la solución desinfectante y por tanto no afectó los cálculos realizados para la preparación de la misma. Por otra parte, la bomba sumergible no presentó ninguna falla durante los tres meses en los que se realizó la evaluación, no obstante, se tuvo la precaución de lavarla y eliminar las impurezas depositadas sobre ella al final de cada ciclo.

**7.7.3 Vulnerabilidad del sistema.** En esta etapa se tuvieron muchos inconvenientes en relación al suministro de energía puesto que este servicio es muy deficiente en la vereda al ser continuamente interrumpido por las tormentas eléctricas dificultando las mediciones de caudal y la toma de muestras.

La situación más preocupante que puso a prueba la vulnerabilidad del sistema, ocurrió cuando una descarga eléctrica proveniente de una fuerte tormenta quemó el transformador del cual se deriva la energía para el acueducto, lo cual provocó daños altamente costosos relacionados con la fundición de algunos sensores en el tablero que controla las motobombas, explotaron los protectores de voltaje instalados para el sistema de desinfección y el de abastecimiento así como también los interruptores de nivel, se quemó la bomba sumergible y se tuvo que reemplazar parte del cableado; adicionalmente en las viviendas aledañas también se registraron una gran cantidad de electrodomésticos afectados. Esto generó una situación de emergencia en la comunidad puesto que estuvieron desabastecidos alrededor de tres días hasta que se logró reestablecer el sistema de abastecimiento, dejando en un segundo plano la reparación del sistema de desinfección.

Con lo ocurrido, se puso a prueba la fragilidad del sistema de desinfección y el accionar de la comunidad y los operarios para reestablecerlo, ante lo cual el balance fue sumamente positivo ya que el tiempo y los costos que implicó la reparación fueron bajos y los operarios no tuvieron inconvenientes para arrancar nuevamente el sistema.

## 8. CONCLUSIONES

Cuando una población no cuenta con una planta de tratamiento, o el tratamiento existente no garantiza agua de alta calidad, se debe asumir el caso como una situación de emergencia, donde la desinfección prima sobre cualquier otro proceso hasta que se construya o se acondicione una planta de tratamiento que garantice que el agua suministrada no represente riesgos para la salud de los consumidores.

La versatilidad en la operación y mantenimiento, la economía y la accesibilidad a los materiales considerados en el diseño del sistema de desinfección, son quizás los parámetros más importantes para garantizar un funcionamiento adecuado en comunidades rurales donde no siempre se cuenta con personal calificado, vías de acceso, o continuidad en los servicios públicos específicamente el de energía eléctrica.

El uso del hipoclorito de calcio granulado como desinfectante proporciona buenos resultados en pequeños sistemas de abastecimiento, poseer la característica de generar un efecto residual, su alta disponibilidad en el comercio, fácil manipulación y transporte le confieren a éste, grandes ventajas sobre otros tipos de desinfectantes.

Resultados atípicos en las concentraciones de coliformes en un punto obedecen a diversas causas, las más comunes se relacionan con una capa persistente de biopelícula adherida sobre las paredes de la tubería en la red de distribución, fugas y averías, conexiones fraudulentas o instalaciones hidráulicas deficientes.

El uso apropiado de herramientas tecnológicas, en este caso el desarrollo de software, permiten facilitar la operación de este tipo de sistemas y minimizar los errores que se pueden generar al momento de calcular los diferentes parámetros que una desinfección apropiada exige.

Finalmente, para desarrollar este tipo de proyectos, es fundamental realizar un trabajo continuo con la comunidad, debido a que son ellos los que conocen mejor que nadie la situación y las posibles formas de solucionar los inconvenientes que se presenten en el camino; además, cuando la comunidad se siente involucrada en todo el proceso, se genera un sentido de pertenencia que potencia la vida útil de los sistemas de tratamiento.

## 9. RECOMENDACIONES

En un sistema de abastecimiento que suministra aguas crudas a los usuarios, es común que sobre las paredes de la tubería se dé lugar a la formación de biopelícula, creando focos de contaminación muy difíciles de controlar; la corrección de este problema requiere de un arduo trabajo y en algunos casos críticos, es necesario reemplazar algunos tramos con tuberías nuevas; por lo anterior, antes de poner en marcha un sistema de tratamiento se recomienda limpiar y desinfectar la red de distribución para evitar que la construcción del sistema haya sido en vano.

Cuando se depende del servicio continuo de energía eléctrica, se sugiere instalar dispositivos que protejan de las variaciones de voltaje a los diferentes equipos instalados, evitando daños e interrupciones en el servicio.

Se debe monitorear de forma continua los niveles de cloro residual en diferentes puntos de la red de distribución y ajustar, si es necesario, la dosis de desinfectante aplicada al agua cruda para garantizar la minimización del riesgo microbiológico.

Se sugiere calibrar periódicamente el caudal de suministro de agua para evitar sobredosificaciones del sistema de desinfección, debido a que el desgaste de la motobomba genera una reducción sobre el caudal bombeado hasta en un 25%.

Se recomienda evaluar el estado de la bomba sumergible al final de cada mes, verificando los niveles de corrosión que la solución desinfectante pueda generar en las partes expuestas a este problema.

Finalmente, se recomienda a la comunidad continuar con la gestión de recursos para la construcción de una planta de tratamiento que les brinde el derecho a consumir agua potable de alta calidad.



## BIBLIOGRAFÍA

- Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P. (2014). *Análisis físico químico y bacteriológico de agua cruda. Fuente: quebrada El Cedro*. Popayán: Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P.
- Adasa. (2016). *Abastecimento de Água - Conceito*. Recuperado el 3 de Junio de 2016, de ADASA Web site: [http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=838%3Aabastecimento-de-agua&catid=74&Itemid=316](http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=838%3Aabastecimento-de-agua&catid=74&Itemid=316)
- Alcaldía de Morales. (2 de Junio de 2016). *Alcaldía de Morales - Cauca. ¡MEJOR ES POSIBLE!* Obtenido de [http://morales-cauca.gov.co/informacion\\_general.shtml#geografia](http://morales-cauca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia)
- Álvarez, R. B. (2011). El agua como derecho fundamental y su protección jurídico-penal. *Prolegómenos - Derechos y Valores de la Facultad de Derecho*, 14(27), 213-229.
- APHA, AWWA, & WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid: Ediciones Días de Santos.
- Chowdhury, S., Champagne, P., & Mclellan, P. J. (1 de Julio de 2009). Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review. *Science of The Total Environment*, 407(14), 4189-4206. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709003441>
- CRC. (2010). *CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL PLAN DEPARTAMENTAL DE AGUAS Y SANEAMIENTO BASICO*. Popayán: Corporación Autónoma Regional del Cauca.
- De Vargas, L., & Barrenechea Martel, A. (2004). CAPÍTULO 10. DESINFECCIÓN. En *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I* (págs. 155-213). Lima: CEPIS/OPS.

- DNP, & SNU. (2005). *Hacia una Colombia equitativa e incluyente. Informe de Colombia. Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación; Sistema de las Naciones Unidas en Colombia.
- Domènech, X., Jardim, W. F., & Litter, M. I. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En M. A. BLESÁ, *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea* (págs. 13-14).
- Fernández-Crehuet Navajas, J. M., Moreno Abril, O., & Pérez López, J. A. (2001). Determinación de Cloro Residual. Método del DPD. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6-7.
- Franco, C. A., Ojeda, E. D., & Medialdea, J. M. (5 de Diciembre de 2005). Permanganato potásico: un potente y versátil oxidante. *Ingeniería Química*, 129-136. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Permanganato%20un%20potente%20y%20versatil%20oxidante.pdf>
- Galvín, R. M. (2015). Evolución de compuestos orgánicos y subproductos de desinfección en sistemas de potabilización de agua. *Revista técnica de medio ambiente*, 28(183), 78-87. Obtenido de <http://www.emacsa.es/wp-content/uploads/2014/11/RETEMA183-2015-78-87.pdf>
- GHO. (2012). *Causes of child mortality 2000–2012*. Global Health Observatory. Obtenido de World Health Organization: [http://www.who.int/gho/child\\_health/mortality/mortality\\_causes\\_region\\_text/en/](http://www.who.int/gho/child_health/mortality/mortality_causes_region_text/en/)
- Gopal, K., Tripathy, S. S., Bersillon, J. L., & Dubey, S. P. (9 de Febrero de 2007). Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1-2), 1-6. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406012878>
- Maya Achicanoy, D. G. (2004). *Estudio de alternativas de desinfección para el control de patógenos en el río Bogotá*. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá: Universidad de los Andes.

McGuigana, K. G., Conroy, R. M., Moslerb, H.-J., Du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernández-Ibáñez, P. (15 de Octubre de 2012). Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 29-46. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/acceso.unicauca.edu.co/science/article/pii/S0304389412007960>

Medina San Juan, J. A. (2000). *Desalación de aguas salobres y de mar: osmosis inversa* (ilustrada ed.). Madrid: Mundi-Prensa.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (4 de Julio de 2007). Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000. Título B Sistemas de acueducto. 26. Bogotá D.C., Colombia: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Ministerio de Desarrollo Económico. (29 de Noviembre de 2000). Resolución 1096 de 2000. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico–RAS. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional.

MINSALUD. (2016). *Análisis de Situación de Salud. Colombia 2015*. Bogotá, COLOMBIA: Ministerio de Salud y Protección Social.

Oliveira Dantas Leite, M. V. (2011). *Subproductos de Cloración Inorgánicos y Orgánicos en las Aguas de Castilla y León. Estado Actual y Perspectivas ante la Revisión de la Directiva Europea*. Tesis doctoral, Universidad de Salamanca, Departamento de Química Analítica Nutrición y Bromatología, Salamanca.

OPS. (2007). *GUÍA PARA LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE DESINFECCIÓN*. Lima: Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de

<http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/agua/guiainstalsistdesinf.pdf>

OPS. (2007). *GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMA DE DESINFECCIÓN*. Lima: Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/agua/guiaseleccsistdesinf.pdf>

OPS, MINSALUD. (2010). *Indicadores Basicos. Situación de Salud en Colombia*. Organización Panamericana de la Salud; Ministerio de la Protección Social.

Peng Lee, K., Arnot, T. C., & Mattia, D. (15 de Marzo de 2011). A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*, 370, 1-22. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738810010045>

Pérez Castillo, H. (2008). *Acciones desinfectantes en la potabilización del agua en pequeñas comunidades*. Sincelejo: Universidad de Sucre.

Ramírez Quirós, F. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloraminas. *Tecnica Industrial*, 260, 56-63. Obtenido de <https://www.micof.es/bd/archivos/archivo2022.pdf>

Ramírez Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. 75-77. Canal Educa.

Romero, M. (22 de Junio de 2012). *Tratamientos utilizados en potabilización de agua*. Obtenido de Boletín Electrónico: <http://www.ozonoalbacete.es/wp-content/uploads/2011/08/estudio-agua-ozono.pdf>

Sadiq, R., & Rodríguez, M. J. (5 de Abril de 2004). Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Science of The Total Environment*, 321(1-3). Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969703005138>

- Severiche Sierra, C. A., Castillo Bertel, M. E., & Acevedo Barrios, R. L. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas*. Cartagena de Indias, Colombia: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Obtenido de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>
- Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). *Desinfección del agua*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- UNICEF. (21 de Marzo de 2014). *Día Mundial del Agua: Los más pobres del mundo son quienes tienen menos acceso al agua potable, afirma UNICEF*. (R. A. Wallace, Ed.) Obtenido de UNICEF: <http://www.unicef.com.co/noticia/dia-mundial-del-agua-los-mas-pobres-del-mundo-son-quienes-tienen-menos-acceso-al-agua-potable-afirma-unicef/>
- UNICEF, & OMS. (2015). *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: Informe de actualización 2015 y evaluación del ODM*. UNICEF y Organización Mundial de la Salud. Obtenido de [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/204485/1/9789243509143\\_spa.pdf?ua=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/204485/1/9789243509143_spa.pdf?ua=1)
- Velasco Velasco, A., & Pechené Tunubalá, A. (30 de Abril de 2015). Entrevista a la Junta Administrativa Acueducto San Roque. (M. E. ARTEAGA HORMAZA, Entrevistador)

ANEXO

Software Cl<sub>2</sub>App ...Ver CD...

# Cl<sub>2</sub>App

