

UNIVERSIDAD NACIONAL

Campus Omar Dengo

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUÍMICA

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN Y SU RELACIÓN CON LA  
CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE LA ASADA DE  
SANTA ROSA, ALAJUELA, COSTA RICA

Trabajo sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de  
Química, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en  
Química Industrial

Bach. Edwin Enrique Salas González

Tutor:

Máster Rolando Sánchez Gutiérrez

Asesoras:

M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

M.Sc. Carolina Alfaro Chinchilla

Heredia, Costa Rica

Noviembre, 2022

“Este trabajo de graduación fue \_\_\_\_\_ por el Tribunal Examinador de la Escuela de Química de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Química Industrial”

Miembros del Tribunal Examinador del Trabajo final de Graduación:

	NOMBRE	FIRMA
Decano	_____	_____
Director de la Escuela	_____	_____
Tutor	<u>Máster Rolando Sánchez Gutiérrez</u>	_____
Asesora	<u>M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez</u>	_____
Asesora	<u>M.Sc. Carolina Alfaro Chinchilla</u>	_____
Lector	_____	_____
Proponente	<u>Bach. Edwin Enrique Salas González</u>	_____

## RESUMEN

La calidad del agua es un aspecto fundamental para los operadores de las ASADAS pues su objetivo principal es asegurar a los usuarios que el agua que consumen es potable y cumple con la normativa nacional pertinente (decreto ejecutivo 38924-S). El presente estudio desarrolló una evaluación del proceso de desinfección en la ASADA de Santa Rosa y su relación con la calidad de agua, identificando el estado del sistema, determinando los parámetros de calidad para un nivel de control N2 de acuerdo con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (RCAP) y presentando una propuesta de desinfección acorde con la realidad de las nacientes, además de una serie de recomendaciones para optimizar las buenas prácticas de desinfección.

Para la identificación del estado del sistema de desinfección se realizó una gira de reconocimiento en agosto de 2021 así como la aplicación de entrevistas al personal de la ASADA. En el caso de la determinación de la calidad de agua y demanda de cloro, se realizaron tres campañas de muestreo en el sistema de abastecimiento desde agosto de 2021 hasta diciembre de 2021, donde se analizaron 10 puntos de muestreo para el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, mientras que, para la demanda de cloro, esta se definió en las dos nacientes principales. El 90% de los parámetros de calidad de agua analizados cumplieron satisfactoriamente con la normativa nacional al encontrarse por debajo de los valores de alerta y máximos admitidos, no obstante, se evidenciaron dos puntos con riesgo alto y un punto con riesgo intermedio por concentraciones menores a 0.3 mg/L de cloro residual y la presencia de coliformes totales y *Escherichia coli*.

También, al utilizar las ecuaciones de las curvas obtenidas fue posible calcular una demanda de cloro que posteriormente fue utilizada en conjunto con valores promedio de datos históricos de caudal en la ASADA para definir una serie de dosis teóricas de pastillas semanales las cuales fueron sistematizadas en una hoja de cálculo de fácil manipulación para los encargados de realizar la desinfección. Finalmente, se realizó un taller de divulgación de resultados para el personal operativo de la ASADA, donde se comunicaron los hallazgos obtenidos y se brindaron una serie de recomendaciones útiles para la operación de la ASADA.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por permitirme culminar este proceso y darme la fuerza de voluntad para continuar aún en los momentos más difíciles.

A mami, papi, mis abuelos, a mi familia y amigos más cercanos que estuvieron pendientes en todo momento y me dieron ánimos, a todos los llevo en mi corazón.

Al Máster Rolando Sánchez Gutiérrez, por tanta ayuda, confianza y orientación brindada, convirtiéndose en un tutor excepcional con un acompañamiento real a todos sus tesisistas y siendo una guía fundamental para que esta investigación pudiera completarse. No me queda duda de la gran calidad de profesional y ser humano que es.

A la asesora M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez por abrirme las puertas para participar en este proyecto y confiar en mi persona desde el primer día, además de todo el acompañamiento durante los diferentes muestreos.

A la asesora M.Sc. Carolina Alfaro Chinchilla por el apoyo y asesoría brindada para fortalecer este trabajo, brindando recomendaciones muy útiles.

A mis colegas José Gabriel, Alexandra, Ruth, Omar, Marianela, Juan, Nicole y demás personas por el apoyo en las campañas de muestreo, asistencia dentro del laboratorio y que de alguna u otra manera me ayudaron durante este proceso.

Al LAMRHI-SIL por habilitarme el espacio para formar parte de esta investigación y brindar los equipos y reactivos necesarios para realizar los análisis necesarios.

A José Ángel, Karina, Joel, Anthony y demás personal del LASEQ, así como a los laboratorios de Hidrología Ambiental y Biotecnología Microbiana por la ayuda con los respectivos análisis y reportes.

A la ASADA de Santa Rosa y su personal, en especial a doña Sonia y don Antonio por colaborar en gran medida con esta investigación con todo lo que necesitamos durante y después de las giras.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por guiarme en todas mis decisiones y ayudar a cumplir lo que soñé desde niño

A mi madre Rocío González Delgado, por ser un ejemplo de supervivencia, demostrándome que todos tenemos un propósito en la vida ¡Esto no hubiera sido posible sin ti mami!

A mi padre Edwin Salas Madrigal, por enseñarme lo que es tener pasión por lo que se hace y apoyarme en todos mis proyectos y anhelos, ¡Este logro también es tuyo papi!

<b>TABLA DE CONTENIDOS</b>	<b>Página</b>
RESUMEN .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
ÍNDICE DE CUADROS .....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	viii
LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS .....	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Antecedentes y justificación .....	10
1.2 Marco teórico .....	12
1.2.1 Agua subterránea y acuíferos .....	12
1.2.2 Sistemas de abastecimiento de agua potable.....	12
1.2.3 Calidad del agua.....	13
1.2.4 Desinfección de agua potable.....	14
1.2.5 Demanda de cloro .....	18
CAPÍTULO II: OBJETIVOS .....	20
2.1 Hipótesis .....	20
2.2 Objetivo general .....	20
2.3 Objetivos específicos y actividades .....	20
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	21
3.1 Descripción del área de estudio .....	21
3.2 Reconocimiento del área de estudio .....	22
3.3 Estado del sistema de desinfección .....	22
3.4 Frecuencia y plan de muestreo para la calidad de calidad de agua .....	23
3.5 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos .....	23

3.6	Análisis de demanda de cloro .....	24
3.7	Análisis de resultados .....	25
3.8	Fortalecimiento de las capacidades en la ASADA de Santa Rosa mediante la generación de insumos y recomendaciones .....	26
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		27
4.1	Identificación del estado del sistema de desinfección .....	27
4.1.1	Generalidades de los sistemas de cloración.....	27
4.1.2	Sistema de cloración para la naciente Cabuyal .....	30
4.1.3	Sistema de cloración para la naciente Bernardino Rodríguez.....	32
4.1.4	Análisis del proceso de desinfección en los sistemas estudiados.....	33
4.2	Parámetros físicos, químicos y microbiológicos .....	35
4.2.1	Parámetros físicos.....	37
4.2.2	Parámetros químicos.....	39
4.2.3	Parámetros microbiológicos.....	43
4.2.4	Cumplimiento normativo del IRCACH.....	45
4.3	Demanda de cloro.....	46
4.3.1	Resultados de las curvas de demanda .....	46
4.3.2	Análisis del comportamiento del cloro residual en el sistema.....	49
4.4	Cálculo de dosis de cloro óptima y propuesta de desinfección.....	51
4.5	Presentación y divulgación de resultados .....	54
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		56
5.1	Conclusiones .....	56
5.2	Recomendaciones .....	58
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		59
ANEXOS.....		69

## ÍNDICE DE CUADROS

## Página

Cuadro 1. Parámetros físicos, químicos, microbiológicos y sus métodos de referencia para analizar en las muestras recolectadas en la ASADA de Santa Rosa .....	24
Cuadro 2. Resumen de parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua del sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa.....	36
Cuadro 3. Comparación del consumo sugerido contra el consumo añadido actualmente de pastillas semanales .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

## Página

Figura 1. Curva de demanda de cloro .....	20
Figura 2. Dosificador de erosión.....	28
Figura 3. Configuración en línea del sistema utilizado en la ASADA de Santa Rosa. ....	28
Figura 4. Estación de cloración Cabuyal .....	31
Figura 5. Jaula protectora del dosificador por erosión .....	32
Figura 6. Estación de cloración Bernardino Rodríguez.....	33
Figura 7. Clasificación de riesgo por muestra según el IRCACH. ....	46
Figura 8. Demanda de cloro de las nacientes Bernardino Rodríguez y Cabuyal del sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa.....	47
Figura 9. Comportamiento del cloro residual en distintos puntos alimentados por las nacientes Cabuyal y Bernardino Rodríguez. ....	49
Figura 10. Comparación del consumo sugerido contra el consumo añadido actualmente de pastillas semanales .....	53
Figura 11. Valores promedio de las tres campañas de muestreo para cada uno de los parámetros físicos analizados.....	77
Figura 12. Valores promedio de las tres campañas de muestreo para cada uno de los parámetros químicos analizados. ....	78
Figura 13. Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los aniones analizados.....	79
Figura 14. Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los cationes analizados.....	80
Figura 15. Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los parámetros microbiológicos analizados. ....	81
Figura 16. Introducción del taller por la M.Sc. Alicia Fonseca .....	107

Figura 17. Presentación de la expositora Nicole Vargas.....	108
Figura 18. Presentación del expositor Edwin Salas .....	109
Figura 19. Público presente en el taller .....	110

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

## **Página**

Anexo 1. Protocolo para la determinación de la demanda de cloro en campo. ....	69
Anexo 2. Procedimiento para la determinación de la demanda de cloro en campo.....	70
Anexo 3. Instrumentos de sistematización de información primaria requerida basados en documentos de la EPA, OMS y guías SERSA. ....	72
Anexo 4. Distribuciones promedio de los distintos parámetros obtenidos en las tres giras de muestreo de calidad de agua. ....	77
Anexo 5. Informe de calidad de agua potable .....	82
Anexo 6. Balance iónico correspondiente a cada muestra en cada campaña de muestreo .....	84
Anexo 7. Puntaje, clasificación y calidad de agua promedio del IRCACH con los datos obtenidos de las tres campañas de muestreo realizadas. ....	85
Anexo 8. Propuesta de desinfección .....	85
Anexo 9. Informe de propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa. ....	86
Anexo 10. Presentación para el taller de desinfección de agua. ....	98
Anexo 11. Programa del taller y fotografías de la actividad .....	102
Anexo 12. Lista de asistencia al taller.....	111

## LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

ASADA	Asociación Administradora de Acueductos y Alcantarillados Comunales
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
RCAP	Reglamento para la calidad del Agua Potable
IRCACH	Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano
RA	Riesgo Alto
VA	Valor de Alerta
VMA	Valor Máximo Admisible
SNAA	Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados
CO	Control Operativo
pH	Potencial de hidrógeno
POR	Potencial oxidación-reducción
SDT	sólidos disueltos totales
OD	Oxígeno disuelto
PSO	Porcentaje de saturación de oxígeno
CT	Coliformes totales
NMP	Número más probable
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
μS/cm	Microsiemens por centímetro
SPD	Subproductos de desinfección
EPA	Agencia de Protección Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
SERSA	Sistema Estandarizado de Regulación de la Salud
LAMRHI-SIL	Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico y Grupo de Investigación en Isótopos Estables
LASEQ	Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos
LHA	Laboratorio de Hidrología Ambiental
E.E	Error estándar

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y justificación

El agua es un recurso esencial para la vida, de la totalidad en el planeta, un 97% corresponde a agua salada y solamente un 3% corresponde a agua dulce. Este porcentaje de agua dulce se puede desglosar en un 2.5% de agua en estado sólido confinada en glaciales o ubicada en zonas subterráneas de difícil acceso y apenas un 0.5% del agua dulce está disponible para consumo humano.<sup>1</sup>

Sin embargo, diversos factores como el cambio climático, el crecimiento de la población, la industrialización y la urbanización han disminuido la disponibilidad de fuentes de agua dulce, aumentando la contaminación de las fuentes de captación de agua a nivel global.<sup>2</sup> Además, el informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas del año 2020 evidenció que hay 2200 millones de personas sin acceso total a fuentes de agua potable, así como otros 4200 millones que no cuentan con sistemas de saneamiento seguros.<sup>3</sup>

En relación con esta problemática y el recurso hídrico nacional, Costa Rica se ha caracterizado por contar con altas tasas de cobertura en los servicios de agua potable.<sup>4</sup> De acuerdo con los datos del Laboratorio Nacional de Aguas (LNA), entre 1990 y 2018, la calidad del agua para consumo humano se incrementó de un 50% a un 92.4%, alcanzando una de las mejores coberturas a nivel latinoamericano.<sup>5</sup> Además, con base en los informes emitidos de calidad de agua, se estima que los sistemas de control, tratamiento y desinfección existentes, cubrieron un 86.3% de la población abastecida con agua potable durante el periodo 2015-2016, y que buscan alcanzar la meta de 95% de cobertura para 2023.<sup>6</sup>

No obstante, estudios han detectado deficiencias en la prestación del servicio, como la ausencia de organización y planeamiento e incumplimiento de parámetros de calidad de agua en distintos sistemas de abastecimiento.<sup>4,7,8</sup> Con la implementación de normativas como el “Reglamento para la calidad del Agua Potable” (RCAP) se establecieron límites máximos permisibles para los parámetros químicos, físicos y microbiológicos asociados a la calidad del agua para consumo

humano, debido a que estos pueden ser alterados por factores naturales o antropogénicos.<sup>9</sup> Adicionalmente, para poder relacionar el grado de riesgo a la salud del consumidor con el incumplimiento de los límites establecidos en el RCAP, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados desarrolló el “Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano” (IRCACH), donde factores como los parámetros microbiológicos actúan como indicadores de contaminación al otorgar un riesgo alto (RA) si su valor máximo admisible (VMA) es superado.<sup>10</sup>

Con la finalidad de evitar el detrimento de la calidad del agua potable, han existido esfuerzos por parte de los operadores de los sistemas de suministro de agua basados en distintas estrategias, un ejemplo es la aplicación de los métodos de desinfección, necesarios para eliminar una gran variedad de patógenos como bacterias u otros microorganismos presentes en el agua.<sup>2</sup> En esta línea, una de las técnicas más usadas es la cloración, que se aplica desde 1900 y se ha consolidado como la más ampliamente utilizada a nivel nacional y mundial por aspectos como el bajo costo, el alto poder desinfectante y la prolongada persistencia para continuar eliminando microorganismos en las redes de suministro de agua.<sup>11</sup> Cabe resaltar que dicho proceso también se debe apegar a los límites mencionados en el RCAP, pues si los niveles de cloro residual son menores a los establecidos, existe el riesgo de contaminación microbiológica y por el contrario, si son superiores al límite, se da la formación de subproductos de desinfección que también representan un riesgo para la salud.<sup>12</sup>

Por estas razones, es importante evaluar la calidad del agua así como el estado de los sistemas de desinfección en funcionamiento con la finalidad de asegurar a los usuarios que se están cumpliendo las normativas nacionales y que el servicio ofrecido no representa riesgos para la salud.<sup>13</sup> En el caso de la Asociación Administradora de Acueductos y Alcantarillados (ASADA) de Santa Rosa de Poás en Alajuela, no se cuenta con estudios formales que permitan determinar el estado de su sistema de desinfección y si este tiene un impacto directo en la calidad del agua, tampoco se ha determinado la demanda de cloro que el agua de sus fuentes requiere. Es así como esta investigación representa un insumo al personal operativo

al brindar información que permita el fortalecimiento de la gestión del tratamiento de agua en esta ASADA.

## **1.2 Marco teórico**

### **1.2.1 Agua subterránea y acuíferos**

El agua subterránea es aquella que se encuentra bajo la superficie terrestre entre formaciones rocosas o poros del subsuelo y puede ser recolectada por medio de perforaciones, drenajes, túneles, o por fuentes naturales como nacientes.<sup>14</sup> Por sus características hidrogeológicas, este tipo de agua suele presentar menor susceptibilidad a la contaminación antropogénica o a fenómenos ambientales.<sup>15</sup> Sin embargo, el agua subterránea no está exenta de deterioro o de sobreexplotación humana, en los casos donde la fuente se ve comprometida, suele ser imposible su recuperación, además los costos operativos tienden a ser muy altos.<sup>16</sup>

Cuando el agua subterránea se encuentra contenida en formaciones geológicas de roca y arena se le conoce como acuífero, el cual es una formación geológica rocosa capaz de ceder, almacenar y transmitir el agua. Estos se pueden clasificar de diversas formas, una de ellas es al analizar la permeabilidad y presión hidrostática, donde se dividen en: acuíferos libres, cuando su nivel de agua se encuentra por debajo del techo de una formación permeable; acuíferos confinados, cuando están cubiertos por una capa impermeable confinante y acuíferos semiconfinados cuando una de las capas no es totalmente impermeable y permite la circulación vertical del agua.<sup>14</sup>

### **1.2.2 Sistemas de abastecimiento de agua potable**

Un sistema de abastecimiento de agua potable está conformado por distintos componentes como captación, conducción, almacenamiento, desinfección y distribución del agua.<sup>17</sup> A nivel nacional, estos sistemas comenzaron a generalizarse entre las comunidades, debido a que son necesarios para ofrecer a la población acceso adecuado al agua para consumo humano en las condiciones actuales.<sup>4</sup> Históricamente, fueron las municipalidades las que se encargaban de cumplir esta labor, hasta que en 1961 se aprobó la creación del Servicio Nacional

de Acueductos y Alcantarillados (SNAA) conocido actualmente como Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Luego de su creación también se formaron otras entidades como las ASADAS, que corresponden a asociaciones locales en diferentes comunidades del país, conformadas por vecinos y delegadas por el AyA.<sup>18</sup>

Las ASADAS captan el agua de distintos tipos de fuentes, sin embargo una de las principales tipos de captación son las nacientes que vienen desde las zonas altas de las montañas, por lo que no necesitan utilizar aguas superficiales para abastecer a las comunidades que les dan cobertura.<sup>19</sup> Además, el agua que proviene de estas fuentes suele presentar óptimas condiciones de calidad, por lo que procesos como la sedimentación o floculación-coagulación no son necesarios, incorporando en los sistemas únicamente las etapas de tratamiento más básicas y necesarias como la eliminación de material suspendido o la desinfección microbiológica, de manera que se disminuyan los costos de producción.<sup>16</sup>

### 1.2.3 Calidad del agua

La calidad del agua es un término usado para englobar características físicas, químicas y biológicas, de forma que al incorporar la información suficiente se pueda realizar una caracterización integral del cuerpo de agua estudiado.<sup>20</sup> Los aspectos físicos describen el hábitat acuático, así como la variabilidad temporal y espacial, siendo los más comunes color, temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales (SDT). También hay aspectos químicos, que describen la naturaleza del agua a partir de análisis de pH, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto (OD), iones disueltos (mayoritarios, minoritarios y traza) y fósforo. Por último, están los aspectos biológicos como la demanda biológica de oxígeno (DBO), coliformes totales (CT) y bacterias como *Escherichia coli* (*E. Coli*).<sup>21</sup>

Para definir que parámetros de calidad de agua son importantes de analizar, es necesario conocer el uso que se le dará al agua, como el consumo humano, la agricultura, la industria, la recreación, entre otras, y de esta forma se pueden seguir indicadores específicos acordes a la actividad que se quiera realizar.<sup>20</sup> Para el caso del agua de consumo humano, en Costa Rica los indicadores químicos, físicos y

biológicos están dados por el decreto 38924-S "Reglamento para la calidad del agua potable" (RCAP). El mismo establece los valores de alerta (VA) que corresponden a concentraciones de sustancias químicas con un riesgo mínimo o aceptable a la salud de los consumidores, los valores máximos admisibles (VMA) correspondientes a sustancias o densidad de bacterias que representan un riesgo inaceptable a la salud y el control operativo (CO) que consiste en un control a nivel de operadores que verifica el cumplimiento de los valores mencionados, así como cuatro niveles de control de calidad, que van desde un programa básico para inspeccionar la operación y mantenimiento de la fuente, el almacenamiento y la red de distribución (N1), pasando por un programa ampliado (N2) y un programa avanzado (N3), hasta un programa ocasional ejecutado en situaciones especiales como emergencias o riesgos inminentes (N4).<sup>9</sup>

En conjunto con este reglamento, se han establecido instrumentos de apoyo como el "Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano" (IRCACH). En este índice donde se establecen cinco niveles de riesgo que responden a un puntaje basado en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que superen el VMA para análisis puntuales o periódicos, una vez que la calificación es asignada, se establece el nivel de riesgo y se clasifica el agua como apta o no apta para consumo humano. Además, este índice se puede aplicar a cualquier tipo de sistema, sea clorado o no.<sup>10</sup>

#### 1.2.4 Desinfección de agua potable

La desinfección consiste en un proceso donde se desactivan o eliminan microorganismos patógenos en las fuentes de abastecimiento de agua, es un tratamiento obligatorio para brindar protección contra enfermedades presentes en el agua y que así las personas cuenten con agua apta para el consumo humano.<sup>22</sup> Se divide en dos grandes procesos: desinfección primaria, encargada de eliminar virus, bacterias, entre otros microorganismos al instante y la desinfección secundaria, donde el desinfectante se mantiene de forma residual, lo que evita el posterior crecimiento de microorganismos en las tuberías y tanques de almacenamiento.<sup>23</sup>

Existe una amplia variedad de procesos de desinfección convencionales, los cuales cuentan con eficacias probadas y aceptadas para el tratamiento de agua potable. Entre estos se encuentra la ozonización, que consiste en la generación de ozono de manera *in situ* al pasar oxígeno u aire seco a través de un sistema de electrodos de alto voltaje, una vez que se genera el ozono este se disuelve en el agua e inicia un proceso de decaimiento donde se liberan radicales libres de peróxido de hidrógeno ( $\text{HO}_2$ ) e hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ), los cuales son oxidantes fuertes y eficaces para la inactivación de los microorganismos principalmente a través del proceso de oxidación protoplasmática, el cual provoca la desintegración de la célula y sus paredes celulares. Además, no requiere de tiempos de contacto prolongados ni de concentraciones altas para hacer efecto, sin embargo, tiene desventajas como su rápida disminución de concentración en agua, lo que no proporciona una protección residual contra contaminaciones futuras, por lo que solo se puede aplicar en una desinfección primaria y debe ser complementado con un desinfectante secundario.<sup>24,25,26</sup>

También existen procesos que aprovechan la radiación como método de desinfección, un ejemplo son las lámparas UV, estas son colocadas alrededor de tuberías con flujo de agua y son configuradas a longitudes de onda de 254 nm aproximadamente.<sup>26</sup> El efecto bactericida se produce debido a que la radiación ultravioleta actúa directamente sobre el ADN de los microorganismos, dañándolo y evitando que estos puedan crecer o replicarse. Entre sus ventajas se encuentra el hecho de que no modifica el sabor ni el olor del agua, que no se puede sobre dosificar, ni tampoco hay formación de subproductos de desinfección, sin embargo, sus desventajas más considerables son el elevado costo de instalación, operación, su baja efectividad en aguas con altos niveles de sólidos suspendidos y que no puede actuar de forma residual, similar al proceso de ozonización.<sup>27</sup>

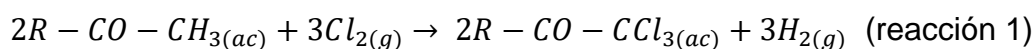
Al contextualizar la desinfección en sistemas de abastecimiento de agua potable, el artículo 17 del RCAP indica que debe existir un nivel de cloro residual que garantice la calidad del agua ante eventuales contaminaciones en la red de distribución, por lo tanto se debe aplicar una desinfección secundaria.<sup>9</sup> Una opción

que se puede considerar en estos casos es la cloraminación, su principio de funcionamiento se basa en la reacción entre el cloro y el amoníaco a partir de una dosificación en condiciones controladas. A pesar de que esta técnica brinda una desinfección menos eficiente comparada con otros métodos tradicionales, es capaz de disminuir la sensación a cloro en el sabor del agua y permite proveer un desinfectante residual que no forma subproductos nocivos, siempre y cuando las condiciones de reacción sean controladas, sin embargo, en fuentes de agua con alta cantidad de materia orgánica, este sistema es contraproducente.<sup>25,28</sup>

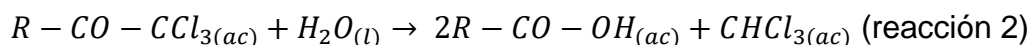
No obstante, desde hace más de un siglo la cloración se ha estado extendiendo como la técnica más comúnmente usada ya que el cloro y sus compuestos derivados poseen bajo costo y alta eficacia como desinfectantes. La eficiencia de los desinfectantes clorados se puede asociar a la interacción de las membranas celulares de los microorganismos patógenos con los compuestos activos del cloro en disolución acuosa, conocidos como ácido hipocloroso y ion hipoclorito, estos son capaces de afectar procesos como la respiración celular y el transporte activo en la célula, produciendo alteraciones físicas, químicas y bioquímicas a la membrana celular, derivando así en su destrucción y con esta la inactivación del patógeno.<sup>29</sup> Otros procesos que ocurren durante el periodo de contacto del desinfectante clorado con el patógeno son las reacciones en la superficie de la célula, así como la descarga de elementos constituyentes como ácidos nucleicos, proteínas, sodio, potasio, entre otros vitales para las funciones dentro de la célula, provocando la muerte del microorganismo, impidiéndole crecer o causar enfermedades.<sup>30</sup>

Sin embargo, la cloración ha presentado ciertas desventajas como los subproductos de desinfección (SPD), que corresponden a compuestos organoclorados provenientes de la reacción entre la materia orgánica presente en el agua y las especies libres de cloro, como los trihalometanos o ácidos haloacéticos.<sup>31</sup> La formación de estos subproductos de desinfección responde a un mecanismo complejo que varía dependiendo del tipo de precursor orgánico que esté presente en el agua, sin embargo, el principio de reacción se puede ejemplificar con

la formación de los trihalometanos (THMs) una de las clases más comunes y abundantes de estos compuestos, este responde a la reacción 1:<sup>32</sup>



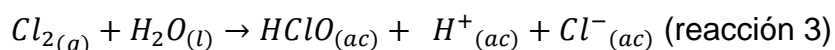
Que es seguida por una hidrólisis, como lo indica la reacción 2:



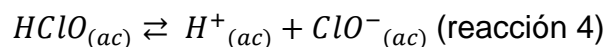
Este proceso da como resultado triclorometano, no obstante, al variar la materia orgánica participante, se pueden formar otras especies de SPD. Estos compuestos son una problemática porque poseen altas toxicidades y efectos dañinos a la salud humana, no obstante, por la falta de alternativas viables y económicas, así como los beneficios obtenidos en comparación con no desinfectar el agua, la cloración sigue liderando la desinfección a nivel mundial.<sup>23</sup>

El cloro es adicionado en los sistemas de desinfección a través de dosificadores, dispositivos que se encargan de suministrar distintos tipos de sustancias como coagulantes, oxidantes, inhibidores de corrosión, desinfectantes, entre otros productos químicos para desinfectar un volumen de agua determinado.<sup>33</sup> Cuando se elige un sistema de dosificación para propósitos de cloración, se debe de tener en cuenta tres factores principales, en primer lugar, hay que conocer las características del producto clorado a utilizar, posteriormente la dosis de cloro necesaria en el agua y finalmente el caudal promedio de agua a desinfectar.<sup>34</sup>

En cuanto al mecanismo de desinfección, este depende en primer lugar del desinfectante que se utiliza, existen gaseosos ( $Cl_2$ ), líquidos como el  $NaClO$ , o sólidos por ejemplo el  $Ca(ClO)_2$ .<sup>22,25,35</sup> Cuando el cloro está en su forma elemental y es añadido al agua, se forma una mezcla de ácido hipocloroso ( $HClO$ ) y ácido clorhídrico ( $HCl$ ), de acuerdo con la reacción 3:<sup>35</sup>



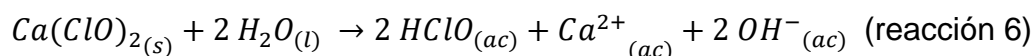
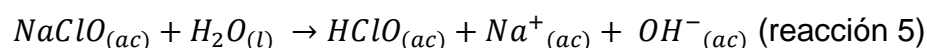
Dicha reacción, es dependiente de la temperatura y el pH, debido a la ionización del ácido hipocloroso en ion hidronio e ion hipoclorito, como se observa en la reacción 4:



Para este caso en específico, hay una mayor presencia de ácido hipocloroso, producto del pH ácido favorecido por la producción de ácido clorhídrico.

En la reacción 4 se observa un equilibrio entre el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, dependiente de factores como la demanda inicial de cloro, el periodo de contacto, la temperatura y el pH. Este equilibrio debe ser controlado pues la desinfección es más efectiva cuando hay mayor presencia de ácido hipocloroso, pues su capacidad desinfectante es de 80 a 100 veces mayor en comparación al ion hipoclorito para la eliminación de bacterias como *E.Coli*.

Con los compuestos clorados como el hipoclorito de sodio o calcio, ocurre un proceso de ionización similar, descrito por las reacciones 5 y 6:



De esta forma, se establece el mismo equilibrio descrito en la reacción 4, con la diferencia de que en ambos casos el pH básico se ve favorecido por la presencia del ion hidróxido, por lo tanto, la capacidad desinfectante disminuye al haber mayor presencia del ion hipoclorito.

#### 1.2.5 Demanda de cloro

Para realizar una correcta cloración y aprovechar la capacidad desinfectante de una manera más eficiente, el primer paso es definir la dosis mínima necesaria de cloro en la fuente que se está tratando a partir de una prueba de demanda de cloro.<sup>22</sup> Este estudio consiste en determinar la diferencia entre la dosis de cloro y la cantidad de cloro residual libre después de un determinado tiempo de contacto, donde se dio lugar la reacción del cloro con la materia orgánica, microorganismos, compuestos reductores, entre otros.<sup>35</sup>

Sin embargo, es necesario considerar algunos conceptos necesarios para comprender este método:

- Dosis de cloro: corresponde a la cantidad total de cloro que se inyecta en el sistema.<sup>22</sup>
- Cloro residual libre: cantidad de cloro activo que queda después suplir la demanda de cloro.<sup>22</sup>
- Cloro combinado: cantidad de cloro residual libre que reacciona con compuestos nitrogenados para formar cloraminas.<sup>35</sup>
- Cloro residual total: suma del cloro residual libre y combinado disponible, o en otras palabras aquel que no fue oxidado por completo.<sup>22</sup>
- Punto final: Punto donde termina la curva, definiendo la concentración del cloro residual total.<sup>22</sup>

La determinación de la demanda se realiza a partir de una curva con concentraciones de cloro añadido y cloro residual. Esta comienza con la reacción del cloro y sustancias disueltas o suspendidas en el agua que actúan como reductoras, por ejemplo, el ácido sulfhídrico, manganeso, hierro, nitritos, entre otros, los cuales por su capacidad de consumir cloro anulan temporalmente el poder desinfectante. Una vez que estas sustancias son oxidadas por completo y al seguir agregando más cloro al sistema, el exceso empieza a reaccionar con todas las sustancias orgánicas presentes como los ácidos húmicos, fúlvicos, o iones amonio para producir compuestos organoclorados y cloraminas con una capacidad desinfectante baja.<sup>25</sup>

Si posterior a este punto se agrega aún más cloro, eventualmente los compuestos organoclorados sufrirán una oxidación total disminuyendo nuevamente los niveles de cloro residual y llevando a la curva a lo que se conoce como el “breakpoint” o punto de quiebre, donde se define la demanda de cloro que corresponde a la dosis mínima para asegurar la presencia de cloro residual libre, no obstante, también se forma el cloro residual combinado producto de los compuestos organoclorados que no fueron destruidos en el proceso de oxidación. Finalmente, se ajusta la dosis para obtener la concentración de cloro residual total óptima en conformidad con el reglamento para la calidad del agua potable (RCAP) para brindar

alto poder desinfectante por un tiempo prolongado sin comprometer la salud de los consumidores como se describe en la Figura 1.<sup>35</sup>

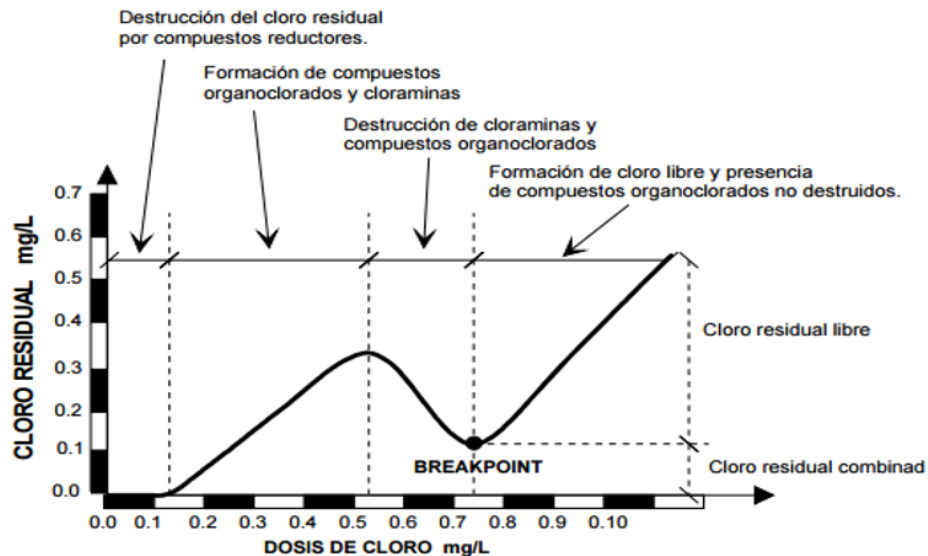


Figura 1. Curva de demanda de cloro<sup>36</sup>

## CAPÍTULO II: OBJETIVOS

### 2.1 Hipótesis

La frecuencia y dosificación óptima para la cloración en la ASADA de Santa Rosa poseen un impacto directo en los parámetros de calidad asociados como el cloro residual y la concentración de microorganismos patógenos.

### 2.2 Objetivo general

Evaluar el estado del sistema de desinfección de agua para consumo humano en la ASADA de Santa Rosa, mediante la determinación de la calidad del agua y el estudio de la curva de demanda de cloro como insumo para la generación de capacidades en la gestión del abastecimiento de agua potable

### 2.3 Objetivos específicos y actividades

1. Identificar el estado del sistema de desinfección de la ASADA de Santa Rosa.
  - 1.1 Giras de reconocimiento del sistema
  - 1.2 Revisión de la información técnica disponible
  - 1.3 Generación y adaptación de instrumentos

- 1.4 Aplicación de los instrumentos
- 1.5 Entrevistas a trabajadores
2. Determinar la curva de demanda de cloro y la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa
  - 2.1 Giras de muestreo
  - 2.2 Análisis físicos, químicos y microbiológicos en campo y laboratorio
  - 2.3 Determinación de la curva de demanda de cloro
  - 2.4 Aplicación del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano
3. Generar recomendaciones e insumos para el fortalecimiento de las capacidades en la gestión del tratamiento de agua de la ASADA de Santa Rosa
  - 3.1 Generación de informes de calidad del agua
  - 3.2 Propuesta de desinfección para el sistema de la ASADA
  - 3.3 Desarrollo de un taller
    - Definición de objetivos
    - Creación de instrumentos
    - Coordinación de localidad
    - Presentación de resultados en un espacio participativo con el personal de la ASADA de Santa Rosa

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1 Descripción del área de estudio**

El cantón de Poás se ubica en la provincia de Alajuela, posee una población de 29199 habitantes de acuerdo con el censo nacional de 2011. Está conformado por cinco distritos: San Pedro, Carrillos, Sabana Redonda, San Juan y San Rafael. Sus coordenadas medias están dadas por 10° 06' 27" latitud norte y 84° 14' 59" longitud oeste, con un área de 73.84 kilómetros cuadrados.<sup>37</sup>

En cuanto al sistema fluvial del cantón, este se encuentra constituido por dos vertientes, Pacífico y Caribe. En la vertiente del pacífico se encuentran los ríos

Poasito, Mastate, Prendas y su afluente Tacaes, todos como nacientes en el cantón, con excepción del río Poás, que nace de la ladera del volcán Poás y drena en la cuenca del río Grande de Tárcoles. Por otro lado, en la vertiente del Caribe se encuentra el río Ángel que es drenado por la cuenca del río Sarapiquí.<sup>38,39</sup>

El área de estudio corresponde al sistema de acueducto administrado por la ASADA de Santa Rosa, ubicado en el distrito de San Rafael. Este se encuentra alimentado por cuatro nacientes de agua, conocidas como Cabuyal, Bernardino Rodríguez, la Viuda y la Catarata, esta última se subdivide en las nacientes Gato y Liles, además, cuenta con nueve tanques de almacenamiento y dos subsistemas de distribución con sus respectivos sistemas de desinfección, uno en la parte alta y el otro en la parte baja del cantón.

### **3.2 Reconocimiento del área de estudio**

La identificación del acueducto administrado por la ASADA de Santa Rosa se realizó por medio de consultas al personal sobre la distribución del acueducto, así como una gira de reconocimiento (agosto 2021), donde se observaron los dos subsistemas de abastecimiento, tres sistemas de desinfección y demás aspectos relevantes asociados, también se consultó material complementario como información generada por los responsables de la ASADA y recursos digitales para completar fichas de campo. De esta forma, se seleccionaron los puntos de muestreo para los análisis realizados.

### **3.3 Estado del sistema de desinfección**

Para la identificación del estado del sistema de desinfección, se realizó una entrevista estructurada al personal operativo de la ASADA basada en instrumentos que sistematizaban la información primaria requerida, además se colocaron observaciones propias con respecto a lo recopilado en la gira de reconocimiento. Estos instrumentos se elaboraron con base en material bibliográfico como el manual del inspector de la agencia de protección ambiental (EPA por sus siglas en inglés), documentos emitidos por la Organización mundial de la Salud (OMS) para la seguridad del agua, así como las guías del sistema estandarizado de regulación de

la salud (SERSA) incluidas en el reglamento de calidad para el agua potable de Costa Rica (RCAP).

### **3.4 Frecuencia y plan de muestreo para la determinación de la calidad de agua**

La frecuencia y ubicación de los puntos de muestreo para el análisis de la calidad del agua se definieron de acuerdo con lo estipulado por el RCAP de forma que estos fueran uniformes y representativos, además se consideró que la población a la que abastece la ASADA de Santa Rosa es inferior a 5000 personas y se tomó en cuenta también la estructura del sistema de abastecimiento observado en la gira de reconocimiento. La red de muestreo se compuso de 10 puntos, tres puntos de muestreo en las fuentes de abastecimiento de los subsistemas 1 y 2 (Cabuyal, Bernardino y La Viuda), tres puntos en los tanques de almacenamiento (Quijote, La Central y Ratoncillal) y cuatro puntos en la red de distribución (los puntos más alejados de la red), estableciendo un nivel de control operativo N2.<sup>9</sup> Se realizaron 3 campañas de muestreo en los meses de agosto, setiembre y noviembre de 2021 para establecer una línea base de la calidad del agua en el acueducto, procesando un total de 30 muestras, representando más de 870 análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua.

Las muestras se recolectaron de acuerdo con las especificaciones del método 1060 C, del Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.<sup>40</sup> Se realizaron análisis en el campo y para aquellos que se debían hacer en el laboratorio, las muestras fueron transportadas en una hielera a una temperatura menor a los 4°C y llevadas el mismo día al Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico (LAMRHI-SIL).

### **3.5 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos**

Los métodos de análisis para los parámetros seleccionados son los definidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water en el cuadro 1, estos fueron aplicados en las tres campañas de muestreo de calidad de agua potable y se realizaron *in situ* o en el laboratorio según correspondía.<sup>40</sup>

Cuadro 1. Parámetros físicos, químicos, microbiológicos y sus métodos de referencia para analizar en las muestras recolectadas en la ASADA de Santa Rosa

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica analítica</b>	<b>Método de referencia</b>
Turbidez	Método nefelométrico <i>in situ</i>	2130 B
pH	Potenciometría <i>in situ</i>	4500-H <sup>+</sup> B
Conductividad	Conductimetría <i>in situ</i>	2510 B
Potencial de oxidación-reducción	Potenciometría <i>in situ</i>	2580 B
Temperatura	Dilatometría <i>in situ</i>	2550 B
Cloro residual libre	Método DPD colorimétrico <i>in situ</i>	4500-Cl G
Demanda de cloro	Método por diferencia <i>in situ</i>	2350 B
Alcalinidad total	Volumetría	2320 B
Dureza total	Volumetría	2340 C
Sólidos disueltos totales	Gravimetría	2540 C
Aniones (cloruro, bromuro, fluoruro, nitrato, nitrito, sulfato) y cationes (litio, calcio, sodio, magnesio, potasio, amonio)	Cromatografía de iones	4110 B
Metales minoritarios (hierro, cobre, zinc, manganeso)	Absorción atómica en llama de aire-acetileno	3111 B
Coliformes fecales	Tubo múltiple	9221 E
<i>E.Coli</i>	Tubo múltiple	9223 B

### **3.6 Análisis de demanda de cloro**

El análisis de demanda de cloro se realizó en las dos nacientes principales del acueducto donde se abastece a la mayor cantidad de usuarios, ambas pertenecían

al subsistema 2 conformado por las nacientes Bernardino Rodríguez y Cabuyal. Este ensayo se realizó en 3 campañas de muestreo durante los meses de agosto, setiembre y diciembre de 2021. La metodología empleada se basó en el método 2350 B del Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water<sup>40</sup> y consistió en la toma directa de muestras de agua de las nacientes, las cuales se fortificaron con cantidades conocidas de las pastillas desinfectantes utilizadas por la ASADA y analizadas previamente para conocer la concentración exacta de cloro disponible de acuerdo con el procedimiento planteado en el anexo 1. Posterior a la adición de las masas, cada muestra se dejó reposar por 30 minutos para que el cloro activo tuviera un tiempo de contacto, tal como lo recomienda la OMS. Cumplido el tiempo se analizó la concentración de cloro según el método 4500-Cl G y utilizando un colorímetro Hanna Instruments Checker<sup>®</sup> HC, dicho procedimiento es detallado en el anexo 2.

Con los resultados obtenidos del análisis de demanda de cloro, se realizó una curva donde se relacionó gráficamente el cloro residual libre de las ocho muestras de agua y la dosis de cloro inicial aplicada a cada una de ellas, para definir la dosis mínima de cloro que asegure la presencia de cloro residual libre en el sistema y respete límites mínimos y máximos establecidos.

Finalmente, con el objetivo de analizar el comportamiento y posibles puntos críticos de pérdidas de cloro en el sistema, se estudiaron los datos de cloro residual libre en los tanques y los sistemas de distribución obtenidos durante las giras de muestreo de calidad de agua aplicando técnicas de estadística inferencial no paramétrica para observar si existían diferencias significativas en la concentración de cloro entre puntos, bajo condiciones de desinfección reciente y después de varios días de añadido el cloro en los dosificadores.

### **3.7 Análisis de resultados**

Como parte del control de calidad de los resultados, se prepararon blancos los cuales fueron analizados junto con las muestras de campo para considerar la presencia o ausencia de contaminación en los instrumentos o reactivos, además de materiales de referencia y muestras control para verificar y calibrar los equipos con

los que se analizaron las distintas muestras, todo esto con el propósito de asegurar la veracidad de los análisis realizados y de la debida preservación de las muestras desde el momento del muestreo hasta el traslado al laboratorio.

Como otro método de control de calidad se realizó el balance iónico, esta técnica busca la detección de errores y sesgos de las especies principales basada en la suma algebraica de los miliequivalentes químicos de las especies aniónicas y catiónicas presentes en las muestras como se observa en la ecuación 1, donde en principio el resultado de esta ecuación debería ser cero de acuerdo con el principio de electroneutralidad del agua, sin embargo, suelen darse desviaciones positivas y negativas producto de errores en la ejecución de los métodos de análisis o la falta de consideración de alguno de los parámetros involucrados.<sup>41</sup> Debido a esto, se define como criterio general un rango de aceptación de un  $\pm 5\%$ , no obstante, este se puede ampliar en caso de que las muestras contengan altas concentraciones de sólidos disueltos totales o conductividades, siendo admisibles rangos de  $\pm 10\%$  para muestras entre los 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .<sup>42</sup>

$$\text{Balance iónico} = \frac{(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)}{(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)} \times 100 \text{ (ecuación 1)}$$

En cuanto al análisis estadístico, se aplicó estadística descriptiva para conocer la media, mediana, desviación estándar, varianza y cuantiles de los diferentes parámetros medidos a las muestras utilizando el lenguaje de programación R, versión 4.0.3 y el paquete ggplot2.<sup>43</sup>

También se aplicó el “Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica” (IRCACH) para asegurar que las muestras de calidad que incumplieron los VMA establecidos por el RCAP en alguno de sus parámetros y poder conocer si hay un posible riesgo a la salud de las personas por consumir el agua estudiada.<sup>10</sup>

### **3.8 Fortalecimiento de las capacidades en la ASADA de Santa Rosa mediante la generación de insumos y recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos, se organizó un taller para el personal de la ASADA y la junta directiva con la finalidad de fomentar las buenas prácticas de

desinfección y brindar recomendaciones que permitan mejorar debilidades con respecto a la desinfección encontradas para el sistema en general. También se emitió un informe de la calidad del agua basado en la normativa nacional vigente para informar si el sistema cumple con los límites permitidos. Además, con los datos de la demanda de cloro se elaboró un informe con la propuesta para mejorar el sistema de cloración, basada en la dosis mínima necesaria de cloro para la fuente de agua estudiada, la dosis de cloro deseada por el operador, el caudal de entrada al dosificador y los datos obtenidos con los instrumentos para la sistematización de la información primaria.

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Identificación del estado del sistema de desinfección**

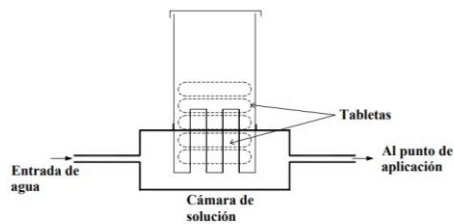
La ASADA de Santa Rosa cuenta con tres sistemas de desinfección enfocados en tratar las aguas de las tres nacientes principales (La Viuda, Cabuyal y Bernardino Rodríguez). Para esta investigación se realizó el estudio de demanda en los dos sistemas de desinfección incluidos dentro de la segunda parte del sistema de abastecimiento (subsistema 2) debido a su mayor cobertura de usuarios. De esta forma y con la información recolectada en la gira de reconocimiento, así como la información suministrada por la ASADA de Santa Rosa, se identificó el estado operacional y estructural que presentaron estos sistemas al momento de realizada esta investigación.

#### **4.1.1 Generalidades de los sistemas de cloración**

Para el caso de la ASADA de Santa Rosa, la elección del dosificador fue realizada previo al inicio de esta investigación, por lo tanto, no fue viable recomendar otro equipo o producto clorado por costos operativos, sin embargo, si es posible emitir nuevas recomendaciones en cuanto a la dosis y el caudal de agua a desinfectar.

Todos los sistemas de desinfección contaban con un dosificador de tabletas de cloro y bromo de alta capacidad Rainbow® modelo HC 3315 de la marca Pentair, que opera bajo la modalidad de dosificación por erosión al utilizar un producto

clorado sólido.<sup>44</sup> El principio de funcionamiento de este equipo se basa en la adición de pastillas desinfectantes y el contacto directo con el agua por medio de una cavidad dentro del dispositivo, de esta manera, se genera una carga de desinfectante constante gracias a la disolución y erosión de la pastilla como se observa en la Figura 2, este tipo de dosificadores suelen recomendarse para un rango de usuarios menor a los 5000 habitantes por su limitada capacidad en desinfectar volúmenes de agua grandes.<sup>34,45</sup>



**Figura 2.** Dosificador de erosión.<sup>45</sup>

Entre los dosificadores de erosión existen diferentes configuraciones como la flotante, en línea y fuera de línea, dentro de la ASADA se utiliza una configuración en línea con cámara húmeda pues suele ser lo más recomendado cuando se utiliza este tipo de pastillas debido a las ventajas que trae con respecto a las demás configuraciones, un ejemplo es que la desinfección depende directamente del flujo de agua que entra al sistema y que al estar todas las pastillas sumergidas simultáneamente tienen un mejor contacto con el agua a tratar y se libera una cantidad mayor de cloro, dicha configuración se aprecia en la Figura 3.<sup>46</sup>



**Figura 3.** Configuración en línea del sistema utilizado en la ASADA de Santa Rosa

Para el caso de los desinfectantes, existe una amplia variedad de productos comerciales para desinfección como el cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, entre otros, cada uno con ventajas y desventajas conocidas.<sup>22</sup> Particularmente dentro de los productos sólidos, el hipoclorito de calcio usualmente es el desinfectante más utilizado, ya que alrededor del 52% de las ASADAS a nivel nacional utilizan el hipoclorito de calcio como su método de desinfección contra un 25% de compuestos isocianúricos.<sup>47</sup>

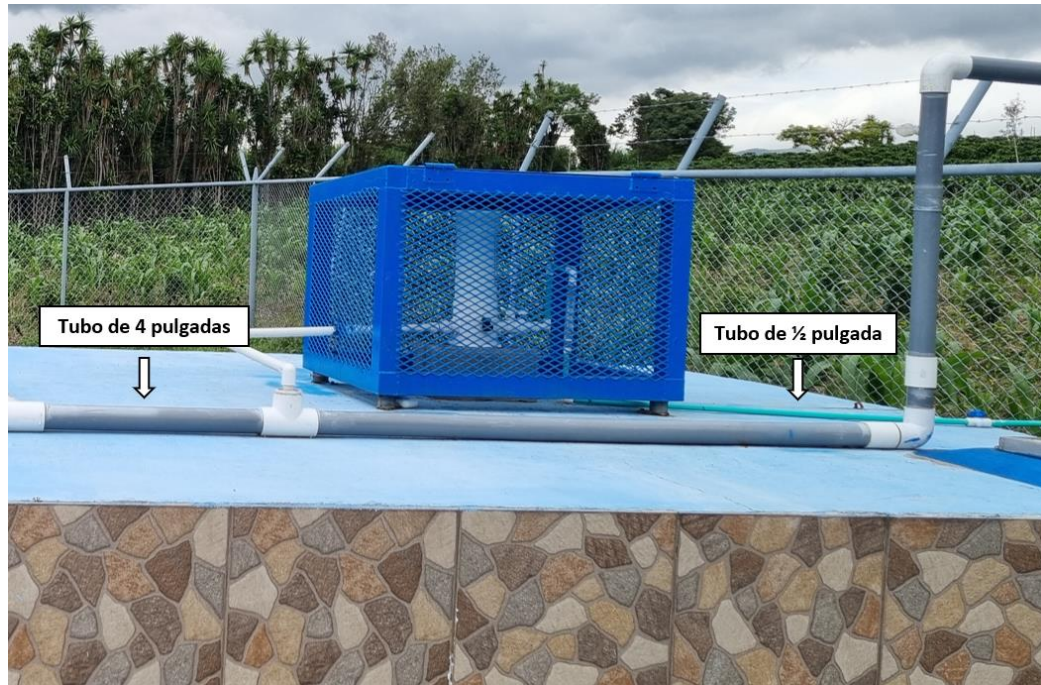
Este desinfectante es de bajo costo, seguro y de fácil adquisición, sin embargo, tiene desventajas como su alta solubilidad, lo cual provoca que deba tener un mayor control operativo por parte del personal de la ASADA ya que las pastillas se disuelven a una mayor velocidad aumentando la frecuencia de adición de estas, además, es necesaria una dosificación más controlada para evitar excesos de cloro en el agua. Otro aspecto para considerar cuando se utiliza hipoclorito de calcio es la adición de iones calcio, lo que aumenta la dureza del agua, principalmente para fuentes donde este ion está presente o en aquellos casos donde este compuesto es usado para elevar el pH producto de otros desinfectantes que bajan en exceso la acidez del agua.<sup>48</sup> Finalmente, para considerar el uso de este desinfectante, se debe tener en cuenta las condiciones de operación de los dosificadores de la ASADA de Santa Rosa, ya que se indica en las especificaciones técnicas de estos dispositivos que no se pueden utilizar con ninguna presentación de hipoclorito de calcio debido a que son incompatibles con las cámaras húmedas por la alta solubilidad de estos compuestos, volviéndolos inviables para este caso en específico.<sup>44</sup>

Por esta razón, el desinfectante utilizado en ambos sistemas de desinfección corresponde a las pastillas ACL<sup>®</sup>90 de la marca OxyChem, un producto comercial que usa como componente activo el ácido tricloroisocianúrico o tricloro-s-triazinatriona ( $C_3N_3O_3Cl_3$ ) compuesto que pertenece a la familia de los isocianúricos clorados y que de acuerdo con el fabricante se reporta una concentración aproximada de 90% de cloro disponible, además de ser compatible con la configuración de cámara húmeda del dosificador de cloro.<sup>49</sup>

Entre las ventajas de utilizar el ácido tricloroisocianúrico, sobresalen características como el alto contenido de cloro, la lenta disolución de las pastillas y una gran estabilidad del cloro disponible ante variaciones de pH en rangos menores a 9, temperaturas entre los 10 y 30 grados Celsius e inclusive contra los rayos del sol, haciendo que este compuesto sea muy útil al emplearse en sistemas de desinfección de agua, pues la pastilla dura más tiempo sin dejar de hacer un aporte de cloro considerable y disminuyendo formación de subproductos de cloración gracias a su estabilidad, además este producto es aceptado por la EPA como un desinfectante en sistemas de agua para consumo humano y residuales.<sup>50</sup> En cuanto a las desventajas, debido a los fuertes olores que estas pastillas generan es necesario que el dosificador cuente con una adecuada ventilación, además, se debe tener un control adecuado del flujo para no tener deficiencias de cloro en la red producto de la baja solubilidad de este compuesto. Las ACL<sup>®</sup>90 también son corrosivas e irritantes para la piel, ojos y vías respiratorias e ingesta, por lo que se debe usar equipo de protección al manipularlas, en cuanto a la toxicidad acuática, estas son muy tóxicas para organismos acuáticos, provocando efectos dañinos a largo plazo.<sup>47,49</sup>

#### **4.1.2 Sistema de cloración para la naciente Cabuyal**

El proceso de desinfección inicia con una división de la tubería principal que transporta el agua desde la naciente como se observa en la Figura 4, un tubo de media pulgada que direcciona un caudal pequeño de agua al dosificador para que tenga contacto con las pastillas de cloro, mientras que el caudal restante continua hacia el tanque principal (Soto 1) a través de una tubería de cuatro pulgadas, ambos caudales se mezclan y posteriormente el exceso de agua es dirigido al tanque de almacenamiento secundario (Soto 2).



**Figura 4.** Estación de cloración Cabuyal

Dentro del dosificador el agua llena la cámara donde se encuentran las pastillas ACL<sup>®</sup>90 que el personal técnico de la ASADA coloca previamente, obteniéndose un caudal de agua con una alta concentración de cloro residual el cual se encarga de enriquecer a la tubería el caudal con el agua sin clorar o cruda dentro del tanque de almacenamiento, donde se da el tiempo de contacto. Este dosificador se encuentra dentro de una jaula metálica, donde está protegido de factores ambientales como el agua de lluvia, sedimentos, o animales, tal como se observa en la Figura 5, esta protección es muy recomendada pues a pesar de que los dosificadores por erosión sean equipos simples que no requieren ni siquiera de flujo eléctrico, pueden ser afectados por agentes externos, interrumpiendo un proceso que por la configuración en la que se encuentra, debe ser siempre continuo.<sup>46</sup>



**Figura 5.** Jaula protectora del dosificador por erosión

#### **4.1.3 Sistema de cloración para la naciente Bernardino Rodríguez**

Este sistema funciona de una forma muy similar al explicado anteriormente, contando con la división del flujo para generar una corriente concentrada que posteriormente se diluye en el tanque de almacenamiento, con la excepción de que el agua sin clorar pasa previamente por un sistema desarenador y sedimentador pues dicha naciente suele presentar problemas de sólidos suspendidos, además, el dosificador no se encuentra protegido por ningún tipo de jaula, de forma que puede sufrir manipulación externa o ambiental, como lo evidencia la Figura 6.



**Figura 6.** Estación de cloración Bernardino Rodríguez

#### **4.1.4 Análisis del proceso de desinfección en los sistemas estudiados**

De acuerdo con la información recolectada en los instrumentos 1 y 2 mostrados en el anexo 3 y con la entrevista estructurada al fontanero encargado, se recolectaron datos importantes respecto al proceso de desinfección. En primer lugar, la calibración fue definida con la ayuda del técnico encargado de la instalación del equipo por medio de un proceso de prueba y error hasta que la concentración de cloro residual libre se encontrara en el rango solicitado por la normativa nacional (0.3 a 0.6 mg/L), se realizaron alrededor de tres visitas y una vez completadas, la desinfección se ha mantenido continua. Como resultado de esta calibración se obtuvo una frecuencia de adición de 7 pastillas cada 8 días para el caso del sistema de desinfección de la naciente Cabuyal y de 9 o 10 pastillas cada 8 días para el sistema de desinfección de la naciente Bernardino Rodríguez. No obstante, se debe tener en cuenta que el proceso de dosificación depende de la forma en como el dosificador está instalado, además de la dosis óptima de cloro y del volumen de agua que se tenga proyectado tratar, generando una ausencia de sistematización de dicho proceso pues es poco probable que esta se mantenga invariable con el tiempo.<sup>51</sup>

Este proceso es realizado por el único fontanero activo al momento de realizada la investigación, el cual se encontraba capacitado con dos cursos, uno sobre

administración para sistemas de acueductos y alcantarillados comunales impartido por el INA y un curso de cloración impartido por la empresa Continex, como capacitación previa para la operación del sistema de abastecimiento. Además, el fontanero indicó que tenía control de una bitácora donde anotaba semanalmente la dosificación realizada. En cuanto a aspectos operativos, la manipulación del dosificador se considera bastante simple pues si se cuenta con un caudal constante solo se debe de monitorear que la cámara se encuentre siempre con la cantidad adecuada de pastillas para operar continuamente, por lo tanto el fontanero estaría capacitado para operar e inclusive optimizar el proceso frente a eventuales recomendaciones, sin embargo, se observó que el caudal de la ASADA es variable, lo cual le agrega un reto a la operación.<sup>52</sup>

Respecto al tiempo que tiene en funcionamiento el sistema de desinfección, este fue actualizado durante el primer semestre de 2019, pues previo a la compra de los dosificadores, se cloraba de una forma empírica con cloradores improvisados. Desde que el dosificador fue instalado este no recibió modificación alguna, además el fontanero aseguró que se mantiene un residual de cloro en todas las redes principales del sistema de desinfección debido a los informes que el ministerio de salud ha emitido en el pasado en sus visitas sanitarias, así como en los reportes operacionales que se le presentan a esta entidad, sin embargo, no se realizan monitoreos internos ocasionales para corroborar que esto siempre ocurra.

Gracias a la naturaleza de estos dosificadores, su vida útil es bastante larga producto de materiales de construcción duraderos, resistencia ambiental y a los compuestos clorados utilizados, siempre y cuando exista un adecuado mantenimiento, por ejemplo, es importante revisar el sistema ante posibles obstrucciones con regularidad ya que este suele ser uno de los problemas más comunes, además en algunas ocasiones es recomendado desacoplar el equipo de su estructura para poder limpiarlo de una forma más profunda.<sup>52</sup>

Las tabletas ALC<sup>®</sup>90 desinfectantes son resguardadas en las cubetas que vienen almacenadas desde fabrica, estas cubetas se colocan en la bodega de la ASADA lejos de la luz solar, sin embargo, el lugar no tiene las condiciones óptimas

de almacenamiento para este tipo de productos, como por ejemplo una buena ventilación para evitar la acumulación de polvo o vapores, el uso de tarimas para no colocar los recipientes directamente en el piso, ni tampoco se cuenta con precauciones en caso de inundación o fugas de agua.<sup>49</sup> Para su manipulación el fontanero no utiliza ningún equipo de protección personal, y el proceso que debe de realizar consta de tres pasos, el cierre de las válvulas de agua, una purga de aire para liberar presión y la colocación una a una de las tabletas desinfectantes. El no utilizar equipo de protección mientras realiza estas acciones representa un riesgo, pues las medidas de protección son útiles e inclusive necesarias, ya que a pesar de que la manipulación de estas pastillas suele ser segura y sencilla, los cuidados mínimos son necesarios para no comprometer la salud a largo plazo del operador.<sup>53</sup>

Finalmente, se aplicó el instrumento 3 el cual corresponde a una adaptación del formato de las guías SERSA para los sistemas de cloración de forma que se pudiera evaluar el nivel de riesgo considerando mayoritariamente factores de infraestructura, así como aspectos operativos.<sup>9,54</sup> Este tipo de herramientas son usadas por el Ministerio de Salud durante sus inspecciones y clasifican el riesgo en 5 categorías, nulo, bajo, intermedio, alto y muy alto.<sup>55</sup>

Como principales hallazgos se encontró que los sistemas carecen de una caseta acondicionada para la preparación y el almacenamiento del cloro, no cuentan con una bitácora donde se registre el caudal de aplicación de cloro o el de agua a clorar, tampoco hay monitoreo de la concentración residual en el tanque y red de distribución, o de parámetros de temperatura, pH, y no se utiliza equipo de protección durante la adición de las pastillas. Con estos resultados, el instrumento 3 identificó la presencia de 6 factores de riesgo de los 10 posibles que contempla el instrumento, clasificando a los dos sistemas de desinfección estudiados de la ASADA de Santa Rosa con un nivel de riesgo alto.

## **4.2 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos**

El cuadro 2 resume los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, así como la estadística descriptiva para cada uno de ellos (promedio, desviación estándar,

entre otros), además en el anexo 4 se muestran los respectivos gráficos con las distribuciones promedio por muestra de estos parámetros.

**Cuadro 2.** Resumen de parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua del sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa.

Parámetro	Unidad	Promedio	D.E	Mínimo	Máximo	CR <sup>b</sup>	OMS <sup>c</sup>
pH	-	6.79	0.12	6.51	7.02	6.0-8.0	6.5-9.5
Turbidez	NTU	0.07	0.26	0.00	1.38	5	-
Conductividad	µS/cm	149.4	43.5	102.0	255.0	400	-
Temperatura	°C	20.57	0.95	19.38	23.81	30	25
POR	mV	502.4	185.2	116.3	706.2	-	-
OD	mg/L	7.44	1.44	3.83	9.59	-	-
PSO	%	95.56	18.78	49.45	122.05	-	-
Cloro residual libre	mg/L	0.27	0.25	0.02	0.71	0.3-0.6	5
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	48.6	6.5	41.5	68.5	-	-
Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>	55.3	13.4	44.2	86.1	400	-
SDT	mg/L	126.1	24.6	87.0	178.0	1000	1000
Fluoruro	mg/L	0.061	0.020	0.049	0.156	0.7	1.5
Cloruro	mg/L	2.547	0.969	1.701	4.703	250	250
Bromuro <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.077	-	-
Nitrito <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.074	0.1	-
Nitrato	mg/L	11.061	8.085	3.136	28.876	50	50
Sulfato	mg/L	5.778	0.866	5.092	7.717	250	500
Litio <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.024	-	-
Sodio	mg/L	3.977	0.590	2.975	4.989	200	200
Potasio	mg/L	1.368	0.540	0.052	2.480	10	-
Magnesio	mg/L	5.276	1.447	4.071	8.494	50	-
Calcio	mg/L	13.491	3.122	10.839	20.327	100	-
Amonio <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.031	0.5	-
Cobre <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.05	2.0	2
Hierro <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.13	0.3	-
Manganeso <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.030	0.5	0.4
Zinc <sup>a</sup>	mg/L	-	-	-	< 0.019	3.0	3
Coliformes fecales	NMP/100 mL	N.A	N.A	0	80	-	0
<i>E.Coli</i>	NMP/100 mL	N.A	N.A	0	80	0	0

Notas: D.E Desviación estándar, POR Potencial oxidación-reducción, OD Oxígeno disuelto, PSO Porcentaje de saturación de oxígeno, SDT Sólidos disueltos totales, NMP Número más probable, N.A no aplica.

<sup>a</sup> >80% de los datos por debajo del límite de cuantificación, <sup>b</sup> RCAP de Costa Rica<sup>9</sup>, <sup>c</sup> Estándares de la organización mundial de la salud<sup>56</sup>

#### 4.2.1 Parámetros físicos

El primer parámetro físico corresponde al pH, este presenta un valor promedio de 6.79 para un agua potable ligeramente ácida, con un rango donde los valores oscilan entre un máximo de 7.02 y un mínimo de 6.51, lo anterior concuerda con lo esperado para un agua natural que producto de interacciones químicas entre dióxido de carbono, iones hidrógeno y demás aniones responsables de la alcalinidad forman un sistema amortiguador entre rangos de pH de 6.0 a 8.5 de manera que no se incumple con la normativa nacional en este caso.<sup>9,57</sup> De acuerdo con el RCAP, el ámbito recomendado de pH para el agua potable se debe encontrar entre 6.0 y 8.0, pues se ha reportado que valores extremos a estos rangos pueden llegar a causar problemas de irritación en mucosa, órganos o inclusive en casos más graves úlceras, además se corre el riesgo de que en pH muy bajos se dé la corrosión de las tuberías por la disolución gradual de metales.

Para el parámetro de turbidez se obtiene un valor promedio de 0.07 NTU oscilando entre valores menores al límite de cuantificación del equipo (<0.02 NTU) y valores máximos de 1.38 NTU, los cuales se encuentran por debajo del valor alerta de 1 NTU y el valor máximo admisible de 5 NTU que se define en la normativa nacional.<sup>9</sup> Una ventaja asociada al cumplimiento regulatorio de este parámetro es que el proceso de cloración se beneficia al no tener variaciones por aumentos en la turbidez nefelométrica, los cuales suelen ser provocados por problemas de sedimentación de sólidos en tanques y redes de distribución, aumentando la demanda de cloro para eliminar materia orgánica suspendida en el agua.<sup>58</sup>

La conductividad eléctrica tiene un valor promedio de 149.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un rango de valores entre 102.0 y 255.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , de acuerdo con el RCAP el valor alerta para incumplimiento de normativa es superior a los 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que no hay riesgo para consumo humano.<sup>9</sup> Es importante velar por que el agua potable no cuente con conductividades muy elevadas debido que como indicador de calidad puede reflejar la cantidad de sustancias ionizables en agua, relacionando conductividades altas con mayores concentraciones de ácidos y bases inorgánicos o sales, planteando inclusive correlaciones con otros parámetros como los sólidos disueltos.<sup>59</sup>

La temperatura presenta un valor promedio de 20.57 °C con un valor mínimo de 19.38 °C y un valor máximo de 23.81°C, todos por debajo del valor máximo admisible de 30°C que estipula la normativa nacional.<sup>9</sup> Otros reglamentos como la directiva holandesa de agua potable o las recomendaciones de la OMS sugieren como valor máximo los 25 °C para limitar el crecimiento de microorganismos principalmente en sistemas con ausencia de desinfección residual, adicionalmente, se sugiere regular la temperatura debido a que puede influir directamente en otros aspectos físicos como la viscosidad, adsorción de productos químicos, contaminantes y patógenos.<sup>60</sup> Y es que esta influencia no se limita solo a parámetros físicos, también se pueden dar procesos químicos de descomposición de cloro, afectando la eficacia de la desinfección y la formación de subproductos dañinos para la salud pues el cloro residual disminuye a medida que la temperatura se incrementa.<sup>61</sup>

Para el caso del potencial de oxidación-reducción, se registra un valor promedio de 502.4 mV con un valor mínimo de 116.3 mV y un valor máximo de 706.2 mV. En el caso de la legislación nacional, esta no provee un valor de referencia para el agua de consumo humano, no obstante, de acuerdo con los estándares recomendados por la organización mundial de la salud a niveles de 650 mV se puede encontrar agua desinfectada y con inactivación de virus natural casi instantánea, por lo tanto el promedio obtenido se encuentra en un valor aceptable para un agua natural.<sup>62</sup>

Con los sólidos disueltos totales se reportan valores mínimos y máximos de 87.0 mg/L y 178.0 m/L respectivamente, así como un valor promedio de 126.3 mg/L, todos por debajo del valor máximo recomendado por la OMS y otros países de 500 mg/L y mucho menor al VMA de 1000 mg/L que establece la normativa nacional vigente y también la OMS.<sup>9,63</sup> Los principales aportes a los SDT provienen de aniones y cationes disueltos en el agua, vinculando este parámetro con el sabor, dureza, corrosión, entre otros aspectos en el agua, por lo que se recomiendan concentraciones bajas para evitar riesgos a la salud por ingesta de sólidos que se acumulan dentro del cuerpo humano.<sup>63</sup>

Finalmente, los últimos parámetros físicos corresponden al oxígeno disuelto con un valor promedio de 7.44 mg/L y oscilaciones entre 3.83 mg/L y 9.59 mg/L así como el porcentaje de saturación que posee un promedio de 95.56% con valores que oscilaron entre 49.45% y 122.05%. Estos parámetros no son contemplados en la normativa nacional pues según la OMS no representan efectos para la salud de las personas, sin embargo esto no significa que no sea un parámetro importante pues en casos como el agua de mar es crítico para la vida marina, donde concentraciones muy bajas o altas pueden causar la muerte de la vida marina.<sup>64,65</sup> Además, el oxígeno se puede utilizar como un indicador de contaminación debido a que en muestras con concentraciones bajas puede existir un elevado crecimiento de microorganismos o una poca actividad fotosintética que puede alterar otros parámetros de calidad de agua.<sup>66</sup> Adicionalmente, el oxígeno disuelto puede tener un efecto regulador en el estado de oxidación de metales traza, así como restringir la cantidad de materia orgánica disuelta.<sup>67</sup>

#### **4.2.2 Parámetros químicos**

Entre los parámetros químicos se encuentra la alcalinidad total, que reporta un valor promedio de 48.6 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  con valores mínimos y máximos de 41.5 mg/L y 68.5 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  respectivamente y al igual que algunos parámetros anteriores, esta tampoco es normada en el RCAP. La alcalinidad en agua potable se asocia principalmente con la presencia de iones bicarbonato actuando como un sistema amortiguador que estabiliza el pH hasta un determinado límite, de acuerdo con algunos autores el rango ideal de alcalinidad oscila entre los 50 y 200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , a nivel internacional se acepta una alcalinidad mínima de 20 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ,<sup>66</sup> pues un agua con valores menores a este son más propensas a contaminaciones debido a que no cuentan con capacidad para resistir modificaciones de pH, adicionalmente, la EPA ha establecido categorías para el agua de acuerdo a la alcalinidad catalogando a aquellas por encima de los 20 mg/L como aguas no sensibles a cambios de pH.<sup>68,69</sup>

El cloro residual evaluado como parámetro de calidad tiene un valor promedio de 0.21 mg/L con valores mínimos inferiores al límite de cuantificación del método

utilizado ( $< 0.02$  mg/L) y un valor máximo de  $0.71$  mg/L. De las 30 muestras analizadas, 21 muestras se encontraron fuera del rango de  $0.3$  mg/L a  $0.6$  mg/L, incumpliendo de esta manera con la normativa nacional, principalmente por valores inferiores a  $0.3$  mg/L, pues con aquellas que superaron los  $0.6$  mg/L el RCAP acepta valores superiores a los  $0.8$  mg/L en no más del 20% de las muestras analizadas o en situaciones de emergencia declaradas por el ministerio de salud.<sup>9</sup> Dicho comportamiento en el cloro residual libre se atribuye a la intermitencia en los periodos de dosificación del sistema por variación de caudales, los cuales no siempre son regulares y pueden cambiar constantemente, afectando así la permanencia del cloro en los tanques de almacenamiento y la red de distribución.

También se determina la dureza total del agua con un valor promedio de  $55.32$  mg/L  $\text{CaCO}_3$  y un rango de valores entre  $44.20$  y  $86.10$  mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . De acuerdo con el RCAP el valor alerta ronda los  $300$  mg/L  $\text{CaCO}_3$  y el valor máximo admisible los  $400$  mg/L  $\text{CaCO}_3$ , los cuales son superiores al promedio obtenido de forma que ninguna de las muestras incumplió con el reglamento nacional.<sup>9</sup> Tomando en cuenta la clasificación de aguas de acuerdo con el contenido de dureza total, la mayoría de las muestras de agua se clasifican como blandas ( $0-75$  mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) categoría ideal para un agua potable debido a que niveles muy bajos de dureza implican una acidificación más sencilla del cuerpo de agua y niveles muy altos a pesar de que en principio pueden ser beneficiosos para los humanos por el aporte de iones calcio y magnesio, estos pueden causar cálculos renales o ataques cardiacos, así como incrustaciones en las tuberías de las casas.<sup>66,68</sup>

En lo que respecta a los iones, se observa una distribución de datos por muestra de los cuatro aniones analizados con la siguiente tendencia de concentraciones:  $\text{NO}_3^-$  ( $11.061$  mg/L, E.E  $1.476$ )  $>$   $\text{SO}_4^{2-}$  ( $5.778$  mg/L, E.E  $0.158$ )  $>$   $\text{Cl}^-$  ( $2.547$  mg/L, E.E  $0.177$ )  $>$   $\text{F}^-$  ( $0.061$  mg/L, E.E  $0.004$ ), con valores por debajo del límite de cuantificación para los aniones  $\text{Br}^-$  y  $\text{NO}_2^-$  y una mayor abundancia de nitrato en las fuentes de agua de la ASADA de Santa Rosa.

El nitrato posee un valor promedio de  $11.061$  mg/L y oscila entre valores de  $3.136$  mg/L y  $28.876$  mg/L, estos al compararse con la normativa nacional no incumplieron

el RCAP pues se acepta como valor máximo concentraciones de hasta 50 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ , o el equivalente al nivel máximo de contaminante (MCL) establecido por la EPA de 10 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$ .<sup>9</sup> No obstante la muestra ASR-04 correspondiente a la naciente Cabuyal, sobrepasó en los tres muestreos realizados el valor de alerta de 25 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  así como los 5 mg/L de  $\text{NO}_3\text{-N}$ , que en aguas subterráneas pueden sugerir posibles contaminaciones por fuentes superficiales, evidenciando una necesidad de monitoreo continuo ya que podría representar un riesgo potencial a largo plazo al ser un punto de importancia en la red de abastecimiento. El consumo excesivo de nitrato en agua potable puede causar problemas a la salud como complicaciones en el embarazo, defectos de nacimiento, aumento del riesgo de cáncer y principalmente interferencias en el transporte de oxígeno por la reducción a nitrito, afectando en mayor medida a los niños.<sup>70,71,72</sup>

Los aumentos del nitrato en el agua se suelen asociar con actividades humanas como el uso de fertilizantes, alcantarillados, efluentes de aguas residuales, desechos animales, entre otros, estas actividades infiltran fluidos con altas concentraciones de nitrato en el suelo que posteriormente terminan en acuíferos causando su contaminación.<sup>73</sup> Para este caso en específico, se puede sugerir una posible influencia por el uso predominante del suelo en actividades agrícolas, sin embargo, para determinar con seguridad el origen de la contaminación, es recomendable el uso de técnicas isotópicas como el análisis de los isótopos  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ , los cuales pueden utilizarse para identificar diferentes fuentes de nitrato a partir de las variaciones en los rangos de datos y el avance en procesos de nitrificación y desnitrificación.<sup>74</sup>

Para el ion sulfato, se obtiene un valor promedio de 5.778 mg/L con valores mínimos y máximos de 5.092 mg/L y 7.717 mg/L respectivamente, dichos valores son menores a los VA y VMA que indica el reglamento nacional de 25 mg/L y 250 mg/L respectivamente.<sup>9</sup> Los valores recomendados a nivel mundial varían entre los 250 mg/L y 500 mg/L entre distintos países y se suelen basar principalmente en los umbrales de olor y sabor ya que los sulfatos pueden contribuir a dar un sabor indeseable en el agua de consumo humano, sin embargo se considera que el

deterioro del sabor es despreciable por debajo de los 250 mg/L, además tampoco se han calculado valores de referencia enfocados a efectos adversos en la salud por medio de agua para este ion.<sup>75,76</sup>

El ion cloruro presenta concentraciones promedio de 2.547 mg/L y valores que variaron en el rango de 1.701 y 4.703 mg/L, los cuales también están por debajo de lo que indica la normativa nacional que para este caso es de 250 mg/L.<sup>9</sup> De manera similar a los sulfatos, según la OMS no existen valores de referencia sobre la presencia de cloruro en el agua potable y efectos nocivos para la salud humana, sin embargo, las sales disueltas que contienen cloruro por encima de los 250 mg/L pueden traer sabores salados al agua siendo este el criterio principal para definir los valores recomendados.<sup>65,77</sup>

Finalmente, el anión que presenta una menor concentración fue el fluoruro, con un promedio de 0.061 mg/L y valores mínimos y máximos de 0.049 y 0.156 mg/L, de la misma forma que con los demás iones, se cumple con la normativa teniendo como valor máximo admisible una concentración de 0.7 mg/L.<sup>9</sup> Este anión es normado pues en altas concentraciones provoca complicaciones a nivel dental, como principal consecuencia esta la fluorosis, una enfermedad endémica en más de 20 países como la India principalmente por las condiciones hidrogeoquímicas de los acuíferos que contienen el agua.<sup>78</sup>

Para las concentraciones de los cationes, se observa la distribución de datos por muestra de los cuatro cationes analizados bajo la siguiente tendencia:  $\text{Ca}^{2+}$ (13.491 mg/L, E.E 0.570) >  $\text{Mg}^{2+}$ (5.276 mg/L, E.E 0.264) >  $\text{Na}^+$ (3.977 mg/L, E.E 0.108) >  $\text{K}^+$ (1.368 mg/L, E.E 0.099), mientras que los cationes  $\text{Li}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  obtuvieron valores por debajo del límite de cuantificación.

El ion calcio se encuentra en un rango de valores entre 10.839 mg/L y 20.327 mg/L, así como un promedio de 13.491 mg/L, en todos los casos las concentraciones obtenidas no superaron el VMA en la normativa nacional de 100 mg/L.<sup>9</sup> Este catión es beneficioso en bajas concentraciones pues juega un rol clave en diversas funciones biológicas, así como en el crecimiento y desarrollo del sistema óseo.<sup>79</sup> También es importante resaltar que el consumo regular de aguas destiladas

o desmineralizadas puede traer efectos subagudos en la salud como fatiga extrema, dolores de cabeza, náuseas, entre otros, debido a que no son aptas para el consumo humano por su deficiencia de sólidos disueltos y elementos esenciales entre ellos el calcio.<sup>80</sup>

Para el caso del ion magnesio, se obtiene un valor promedio de 5.276 mg/L con valores máximos y mínimos de 4.071 mg/L y 8.494 mg/L, todos por debajo del valor máximo admisible de 50 mg/L en el RCAP.<sup>9</sup> Al igual que el calcio, el magnesio debe estar presente en agua potable pues puede llegar a tener un efecto protector contra algunas enfermedades crónicas, no obstante, no se cuentan con valores mínimos recomendados por parte de la OMS pues la evidencia científica es insuficiente para proponer pautas actualizadas sobre el calcio o el magnesio en el agua.<sup>81</sup>

El catión sodio presenta un valor promedio de 3.977 mg/L con valores entre 2.975 mg/L y 4.989 mg/L, muy por debajo del VMA de 200 mg/L. Sobre estos límites, la EPA emitió una directriz donde recomienda que el agua no supere los 20 mg/L de sodio ya que altos consumos de este catión son asociados a problemas de hipertensión, así como cálculos renales debido a que la presencia de sodio en el agua suele estar relacionada con el cloruro de sodio.<sup>82</sup>

Finalmente, de los cationes el que presenta la menor concentración fue el potasio, con un valor promedio de 1.368 mg/L así como valores mínimos y máximos de 0.052 mg/L y 2.480 mg/L respectivamente. Este elemento es esencial en la dieta diaria y es poco probable encontrarlo en niveles que puedan ser de preocupación para los seres humanos en fuentes naturales.<sup>83</sup>

En cuanto a los metales minoritarios (Cu, Fe, Mn y Zn), ninguna muestra supera los respectivos límites de cuantificación para cada uno de estos metales, por lo que no se realizó tratamiento estadístico alguno.

#### **4.2.3 Parámetros microbiológicos**

En el agua potable, los coliformes totales (CT) y *E. Coli* se utilizan como indicadores biológicos de contaminación microbiana. Los coliformes totales corresponden a un grupo de bacterias que comúnmente se encuentran en suelos,

vegetación e intestinos, incluidos los humanos, en los últimos años se ha discutido su utilidad como indicador de contaminación, no obstante, aún sigue siendo un indicador de calidad en diversos países e inclusive son utilizados como instrumentos reguladores gracias a la alta sensibilidad del método analítico y su capacidad de detectar bajas concentraciones, así a su resistencia microbiana a la desinfección.<sup>84</sup> *E. Coli* suele ser la bacteria más abundante encontrada en el agua, asociando su presencia con un riesgo para la salud de las personas así como una alta posibilidad de encontrar otros virus y bacterias dañinas de origen fecal tales como *Giardia*, *Cryptosporidium* y *Shigella*. Adicionalmente, es común encontrarla como el indicador más utilizado pues no todos los coliformes son de origen fecal y los métodos de detección están mejor desarrollados y probados para *E. Coli*, de manera que si después de un proceso de desinfección la muestra está libre de esta bacteria se concluye que el método de desinfección fue efectivo y el agua está libre de contaminación fecal, sin necesitar de otro tipo de análisis.<sup>85</sup>

Como parte del análisis microbiológico, se analiza la presencia de estos dos parámetros para las 30 muestras distribuidas en los 10 puntos de muestreo. De acuerdo con el cuadro 2 se observan valores en un rango de 0 a 80 NMP/100 mL, en el caso de coliformes totales, con presencia únicamente en 5 de 30 análisis realizados, mientras que para *E. Coli* solamente se obtiene presencia en 4 de los 30 análisis. Los valores mayores a cero pertenecen a las muestras ASR-01, ASR-04 y ASR-06, de acuerdo con el RCAP, para aguas de consumo humano las muestras deben presentar ausencia de estos microorganismos, por lo tanto, los tres puntos donde se tomaron las muestras mencionadas incumplen con el reglamento nacional.

Las tres muestras con presencia positiva corresponden a las nacientes analizadas; en las cuales fuentes potenciales de contaminación como lixiviados de estiércol de ganado, escorrentía agrícola, tanques sépticos, entre otras actividades humanas pueden contribuir a contaminar las fuentes de agua subterránea, dando origen al crecimiento de organismos patógenos, de forma que es importante

gestionar adecuadamente la desinfección para eliminar la presencia de virus y bacterias en el agua.<sup>86,87</sup>

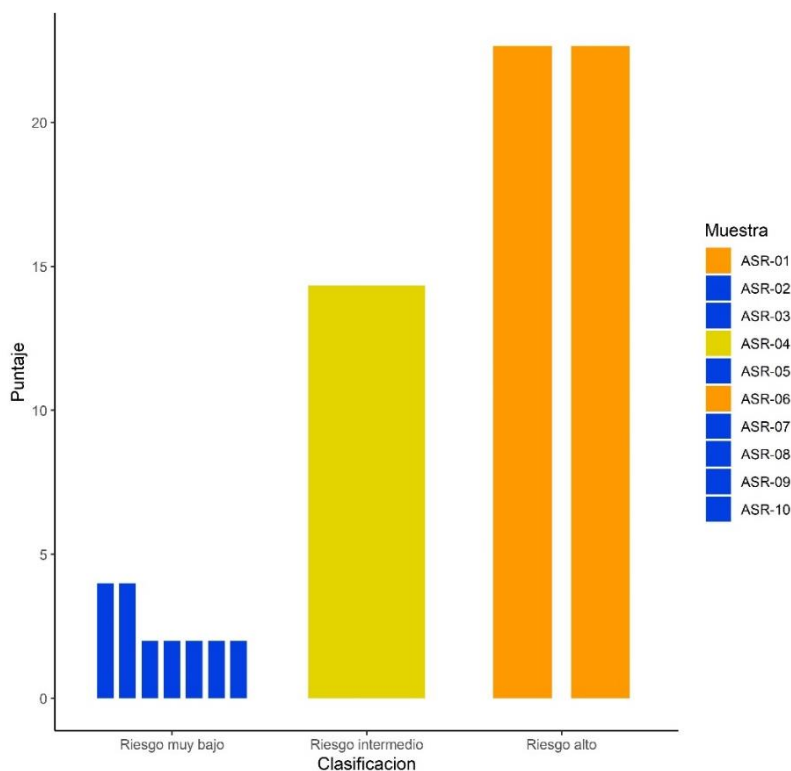
#### **4.2.4 Cumplimiento normativo del IRCACH**

Se aplica el índice de riesgo para la calidad de agua de consumo humano utilizando un total de 20 parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Esta cantidad respondió al alcance de la investigación que planteó un nivel de control de calidad N2, cuyos análisis se registraron en el informe de calidad para la ASADA de Santa Rosa presente en el anexo 5.<sup>9,10</sup>

Al analizar los resultados, se observa como únicamente el cloro residual libre y los coliformes fecales contribuyeron a las calificaciones de riesgo para las muestras en estudio. Ambos parámetros son críticos pues en el caso del cloro residual concentraciones muy altas (superiores a 1 mg/L) pueden provocar rechazos por los consumidores y valores muy bajos (menores a 0.3 mg/L) implican un riesgo de contaminación microbiana debido a que el agua analizada no posee un efecto residual para evitar futuros crecimientos de bacterias, virus, entre otros.<sup>88</sup>

En el IRCACH los coliformes fecales tienen una gran relevancia para el agua de consumo humano pues la presencia de estos se asocia con una posible contaminación y efectos adversos a la salud, asignando directamente un riesgo alto que sumado a niveles bajos de cloro residual colocan a las muestras con la clasificación máxima de riesgo.<sup>10</sup> Las muestras con presencia positiva de CT y E. Coli fueron ASR-01, ASR-04 y ASR-06.

Como resultados finales, se obtuvieron 7 muestras con un nivel de riesgo muy bajo (RMB), una muestra con nivel de riesgo intermedio (RI) y dos muestras con nivel de riesgo alto (RA) tal y como se observa en la figura 7.



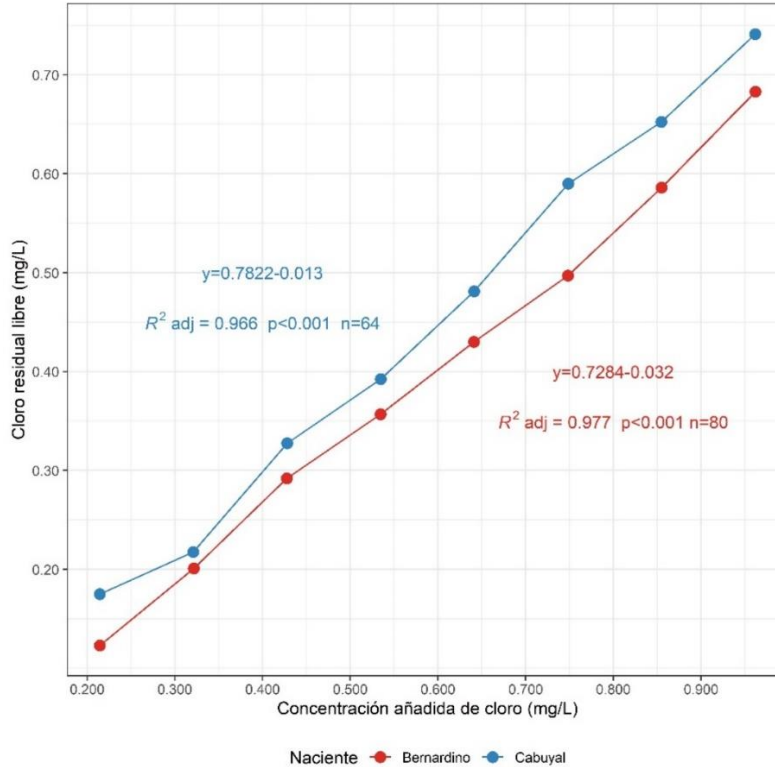
**Figura 7.** Clasificación de riesgo por muestra según el IRCACH.

Las muestras con riesgo intermedio y alto correspondientes a las tres nacientes de agua (Cabuyal, Bernardino Rodríguez y la Viuda) se clasificaron como no aptas para la ingesta de acuerdo con el IRCACH, estos resultados refuerzan la importancia de la desinfección de las aguas de esta ASADA, debido a que sin dicho proceso se estaría poniendo en riesgo la salud de los usuarios pues la calidad de agua de las fuentes es de alto riesgo. Esto implica que la cloración tiene un impacto directo en la calidad del agua, mostrando una clara mejoría posterior a las estaciones de desinfección de todas las fuentes, no obstante, si el proceso se interrumpe o no se entrega una dosis de cloro adecuada se puede dar paso a un crecimiento microbiano no deseado.

### **4.3 Demanda de cloro**

#### **4.3.1 Resultados de las curvas de demanda**

La Figura 8 muestra las curvas obtenidas para las dos nacientes estudiadas:



**Figura 8.** Demanda de cloro de las nacientes Bernardino Rodríguez y Cabuyal del sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa.

Se observa que el comportamiento de las curvas para ambas nacientes es similar en los tres muestreos realizados, la tendencia que siguieron las muestras respondió a una disminución de la concentración de cloro residual libre con respecto a la concentración de cloro añadido inicialmente, permitiendo establecer una alta correlación entre ambas variables descrita por un modelo de regresión lineal aplicado con factores de determinación de 0.966 y 0.977 respectivamente.<sup>89</sup>

Debido a la forma de las curvas observadas en la Figura 8 se deduce que no hay un punto de quiebre definido como los observados en la literatura, un comportamiento semejante al de otras investigaciones realizadas en agua potable.<sup>90,91,92,54</sup> Esto es de esperar en aguas con bajas concentraciones de sólidos suspendidos y disueltos, materia orgánica o compuestos oxidables como hierro, amonio, manganeso, nitritos, entre otros; situación respaldada por los análisis de calidad donde estos iones se encontraron por debajo del límite de cuantificación.<sup>90</sup> Dicha tendencia también es

observable inclusive en aguas con mayores consumos de cloro, como en la investigación de Perales donde se observan demandas de cloro de 1.55 mg/L y 1.78 mg/L pero con curvas que siguen una tendencia mayormente lineal.

No obstante, el modelo obtenido no responde a una relación 1:1, pues se presentaron pérdidas de aproximadamente una tercera parte del cloro residual adicionado inicialmente calculadas a partir de las concentraciones aplicadas a cada una de las muestras y las concentraciones finales obtenidas, de no existir demanda de cloro en las fuentes el comportamiento debería ser lineal, escenario que no ocurre.<sup>92</sup> Este comportamiento también podría ser atribuido a la posibilidad de que, por limitaciones del equipo en cuanto a su límite de cuantificación y detección, este no permitiera observar variaciones que pudieran mostrar un punto de quiebre definido a unidades más pequeñas como en ppb, siendo necesario una mayor rigurosidad analítica y un equipo más sensible para trabajar con agua potable. Por lo tanto, al no observarse el punto de quiebre, se utilizan las ecuaciones de las curvas indicadas en la Figura 8 para definir una baja demanda que consume una pequeña dosis de cloro en cada nacimiento.

Entre ambos modelos, aquel con mayor dispersión de datos fue el de la curva de Cabuyal, sin embargo, en lo que respecta al cloro residual, es la nacimiento Bernardino Rodríguez la que presentó un mayor consumo, pues al comparar los valores individuales de las muestras de agua, la nacimiento Bernardino obtuvo en la mayoría de los casos una menor concentración de cloro residual libre, producto del mayor consumo. En la Figura 8 también se observa que ambas curvas parten de distintos valores de cloro residual libre respecto al eje y, no superponiéndose entre sí, evidencia de consumos diferenciados para ambas nacientes y un dato importante a considerar al construir la propuesta de desinfección.

En lo que respecta a la diferenciación entre curvas, podía existir una diferencia significativa entre la relación de las variables de estudio para cada nacimiento, estadísticamente esto fue analizado mediante una prueba de inferencia donde se compararon las pendientes de ambos modelos por medio de un análisis de medias marginales estimadas.<sup>93,94</sup> Dicha prueba confirma la diferencia entre los modelos



En el caso de la naciente Cabuyal la distribución de datos por sitio presenta un comportamiento donde el valor medio para el cloro residual libre en los tanques tiende a ser ligeramente mayor respecto a la red de distribución tanto en el escenario de dos días después como en el de diez días después de la cloración. Esto fue debidamente analizado con un análisis de contraste a través de las medias marginales estimadas, demostrando que, a pesar de esta tendencia, no existe una diferencia estadísticamente significativa en los valores de cloro residual libre de los tanques y la red de distribución. El análisis anterior se realiza también para los sitios de la naciente Bernardino Rodríguez y se observa que la distribución de datos por sitio sigue un comportamiento similar donde el valor medio del cloro residual libre en los tanques fue mayor y disminuyó a lo largo del sistema hasta la red de distribución sin importar la cantidad de días posteriores a la desinfección. Al igual que con la naciente Cabuyal, lo anterior fue debidamente validado en el análisis de contraste a través de las medias marginales estimadas y se demuestra que para esta naciente tampoco existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de cloro residual de los sitios en estudio.

Como es normal en los sistemas de abastecimiento de agua, a medida que se avanza desde la estación de desinfección, la concentración de cloro residual comienza a disminuir. No obstante, en el caso de la ASADA de Santa Rosa al considerar que para ambas nacientes las diferencias entre tanques y redes de distribución no fueron significativas y que los valores promedio de decaimiento oscilaron entre 0 hasta 0.06 mg/L de cloro residual, se puede asumir que el decaimiento de la concentración de cloro no es relevante para considerar en la propuesta de desinfección. Al consultar investigaciones donde si se consideró el decaimiento para el cálculo de la dosis óptima, se puede mencionar la realizada por Gómez y Payán, donde se obtuvieron variaciones en un rango de 0.05 a 0.30 mg/L de cloro residual pero con un comportamiento muy similar al obtenido en esta investigación, para un sistema de abastecimiento con una extensión de 6 km aproximadamente, siendo necesario considerar otro aumento a la dosis aplicada no solo por la demanda de cloro del agua, sino también para asegurar la concentración deseada en todo el sistema.<sup>90</sup>

#### 4.4 Cálculo de dosis de cloro óptima y propuesta de desinfección.

Para definir la dosis de cloro óptima primero fue necesario determinar algunas condiciones del sistema. En primer lugar, se encuentran el caudal (Q) y el volumen diario de agua a desinfectar (V), debido a que el caudal de las nacientes de la ASADA es variable, se trabaja con un rango de caudales posibles entre 1 L/s y 6 L/s, de forma que se presenten escenarios posibles a los que el fontanero se pueda enfrentar, no obstante, en el informe de propuesta de desinfección que se le entregó a la ASADA se emitieron recomendaciones para poder calcularlo de una manera más precisa. Una vez realizada esta observación, el volumen a desinfectar por día se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = Q \left( \frac{L}{s} \right) * \frac{86400 s}{1 \text{ día}} \text{ (ecuación 2)}^{95}$$

También fue necesario definir la concentración de cloro necesaria ( $C_n$ ), para esto se utilizan las ecuaciones de cada una de las curvas de demanda de cloro presentadas en la figura 8, estas ecuaciones corrigen las concentraciones con el consumo de cloro que cada una de las nacientes posee, asegurando la permanencia de la concentración deseada en el agua. En ambos sistemas se asume una concentración de cloro residual libre deseada de 0.6 mg/L (concentración máxima aceptada en el RCAP) después del tiempo de contacto, de manera que con el paso de los días esta concentración continúe en el rango adecuado, aprovechando también el hecho de que el comportamiento del cloro residual en el sistema es bastante uniforme, por lo que no se esperan pérdidas considerables. La determinación se muestra a continuación:

Para la naciente Cabuyal:

$$y = 0.7822x - 0.013 \text{ (figura 8)}$$

$$0.6 = 0.7822x - 0.013$$

$$x = 0.7837 \frac{mg}{L}$$

Para la naciente Bernardino Rodríguez:

$$y = 0.7824x - 0.032 \text{ (figura 8)}$$

$$0,6 = 0.7824x - 0.032$$

$$x = 0.8077 \frac{mg}{L}$$

Donde x = Concentración de cloro necesaria (mg/L)

Finalmente, el último parámetro por definir es el porcentaje de cloro disponible en las pastillas de la ASADA (%Cl<sub>2</sub>) el cual por medio de un análisis previo realizado en el laboratorio se definió como 87.5%, este análisis se basó en el método 4500-Cl.<sup>40</sup> Con toda la información anterior, fue posible plantear la siguiente ecuación para definir la dosis óptima, que corresponde a la cantidad de cloro a añadir en gramos cuando se considera la máxima disolución de las pastillas. Para este planteamiento se considera el volumen a desinfectar para un día definido con la ecuación 1, la concentración de cloro por añadir necesaria para alcanzar la concentración deseada de 0.6 mg/L y el porcentaje de cloro disponible en una tableta.

$$P = \frac{V * C_n}{10 * \%Cl} \text{ (ecuación 3)}^{48}$$

Donde:

P = Dosis de cloro añadida en gramos (considerando máxima disolución)

V = Volumen a desinfectar para un día (L)

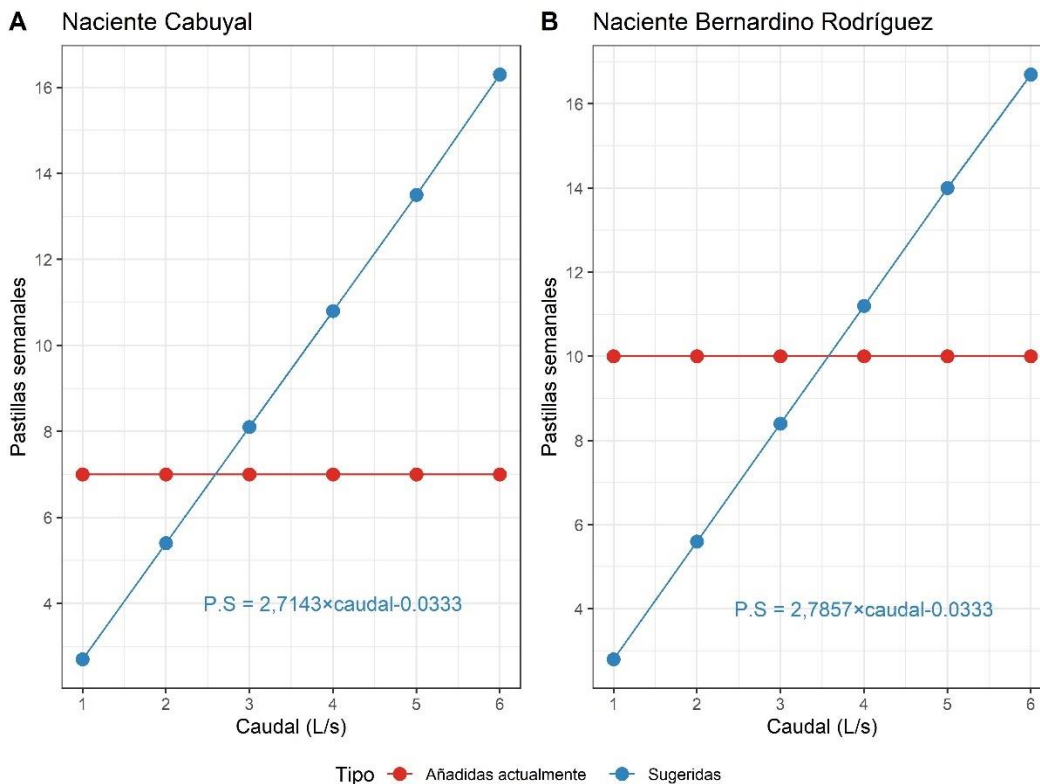
C<sub>n</sub> = Concentración de cloro necesaria de acuerdo con la demanda (mg/L)

%Cl: Porcentaje de cloro en las pastillas

Una vez calculada la dosis teórica sugerida para los caudales planteados, esta se multiplicó por 7 para tener una dosis semanal y se dividió entre 200 g que corresponde al peso unitario de cada pastilla, de manera que se pueda tener una cantidad de pastillas semanales, dato mucho más práctico para efectos de operación de la ASADA. Finalmente, con la ecuación 3 definida y el ajuste a pastillas semanales ya

mencionado, se sistematizó una hoja de cálculo de Excel capaz de brindar las pastillas semanales necesarias de acuerdo con caudal presente en el clorador y la concentración residual deseada.

Para efectos prácticos, se consideran caudales de 1 a 6 L/s en el dosificador para definir seis posibles dosis sugeridas, estas fueron calculadas a partir del procedimiento descrito anteriormente y se comparan con la cantidad de pastillas semanales que el fontanero indicó que suministraba en la entrevista (instrumento 2 del anexo 3) donde cuenta que se utilizan 7 pastillas para la naciente Cabuyal y 10 pastillas para Bernardino Rodríguez, producto de la única calibración que recibió el sistema, tal y como se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Comparación del consumo sugerido contra el consumo añadido actualmente de pastillas semanales

De esta manera, la cantidad de pastillas necesarias aumenta gradualmente dependiendo del caudal de entrada de agua al dosificador, de acuerdo con los resultados obtenidos, la cantidad de pastillas añadidas actualmente es adecuada para

obtener 0.6 mg/L de cloro residual solamente cuando el caudal ronda los 3 L/s aproximadamente, sin embargo, si el caudal es mayor o menor la cantidad varía y en algunos casos de manera considerable. Este dato es de gran relevancia pues hasta el momento de realizados los muestreos semanalmente se usaba una cantidad de pastillas fija, sin ningún tipo de ajuste o variación, además, no se media con frecuencia los niveles de cloro residual libre, por lo que no se tenía conocimiento si la dosis aplicada es la correcta más allá de los reportes de rutina emitidos por el LNA y el AyA. También es importante resaltar que la determinación de la demanda de cloro en conjunto con la medición de caudales se ha implementado en otras investigaciones asociadas a sistemas de abastecimiento que utilizan ácido tricloroisocianúrico como fue el caso de la ASADA de Horquetas de Sarapiquí, arrojando resultados congruentes para evaluar las diferencias existentes entre la operación actual y las propuestas teóricas realizadas, por lo que la aplicación de una metodología similar es una opción viable para el agua que administra la ASADA de Santa Rosa, sin embargo no es una medida definitiva para asegurar una desinfección ideal considerando las limitaciones que tiene la cloración con pastillas y tabletas.<sup>95</sup>

#### **4.5 Presentación y divulgación de resultados**

En el anexo 9 se presenta el informe de la propuesta de desinfección que se le entregó a la ASADA, donde se describe el procedimiento realizado para la determinación en campo de la demanda de cloro, además se evidenció que la frecuencia y la dosificación tienen una gran influencia en la concentración de cloro residual, por lo tanto, son parámetros que no se pueden mantener constantes y necesitan un monitoreo habitual. Este informe se centró en 3 problemáticas principales para la desinfección, mostrando una guía para mejorar las buenas prácticas de desinfección, así como para aportar información valiosa a futuras investigaciones que se realicen dentro de la ASADA.

Con la finalidad de mostrar los hallazgos de la investigación, transmitir las recomendaciones y brindar conocimiento general pero útil sobre el cuidado del agua, se preparó un taller en conjunto con la estudiante de Biología Nicole Vargas Alvarado titulado “Fortalecimiento de las capacidades en planes de seguridad del

agua y sistemas de desinfección para la ASADA de Santa Rosa” sobre los principios básicos de los planes de seguridad del agua y las buenas prácticas de cloración, además de la propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa. Dicho taller estuvo dirigido al personal administrativo, operativo y a la junta directiva de la ASADA. En el anexo 10 se muestra la presentación utilizada en formato Power Point, en el anexo 11 el programa utilizado y fotografías de la actividad, mientras que en el anexo 12 la lista de participantes del taller.

El taller se impartió el 8 de setiembre en la sala de reuniones de la ASADA de Santa Rosa e inició a las 7:15 p.m con una presentación a cargo de la M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez para explicar a los presentes el motivo del taller e introducir a los expositores. Finalizada la introducción, se invitó a los participantes a participar de una actividad “rompe hielo” a través de la plataforma Kahoot.it, donde podían realizar una trivía con 9 preguntas relacionadas a los planes de seguridad del agua y la desinfección de agua. Esta actividad tuvo como propósito introducir conceptos claves para el desarrollo del taller y de paso realizar un diagnóstico a los participantes de los conocimientos básicos que manejaban para facilitar la comunicación entre los expositores con el público presente, finalizada la trivía se tomaron 3 ganadores los cuales fueron reconocidos con un premio simbólico por su participación.

Seguidamente, se repartió un refrigerio y la expositora Nicole Vargas dio inicio con su presentación titulada “Contexto y Generalidades de los PSA” por un periodo de 20 minutos aproximadamente, terminando con un espacio para preguntas donde los integrantes de la junta directiva le realizaron consultas sobre los instrumentos utilizados en los PSA. Finalmente, el taller terminó con la presentación del expositor Edwin Salas titulada “Informe de propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa” por alrededor de 30 minutos, esta presentación hizo un repaso por los principios básicos de la cloración y le presentó los resultados obtenidos de la investigación, como los datos de calidad de agua, las curvas de demanda de cloro, la hoja de cálculo para calcular la dosis adecuada, entre otros, también se dio un espacio para preguntas donde se explicaron aspectos relacionados al cloro como

desinfectante, la importancia de la medición del caudal y el cloro residual dentro del sistema de abastecimiento para que la propuesta sea efectiva. Concluidas las preguntas se finalizó el taller a las 9 p.m.

Por último, en función de la divulgación de resultados y la comunicación científica se inscribió la presente investigación en el “Congreso de Química 2022 Hacia el desarrollo sostenible” bajo el nombre “Determinación de la demanda de cloro y la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de la ASADA de Santa Rosa de Poás, Alajuela” la cual ya se encuentra aprobada por el comité científico organizador en la modalidad de póster y será presentada entre el 28 de noviembre y el 1 de diciembre del 2022 en el aula Magna de la Universidad de Costa Rica, donde se espera tener un intercambio de opiniones y criterios con otros investigadores para enriquecer esta y futuras investigaciones relacionadas con la desinfección de agua de consumo humano.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Los sistemas de desinfección de la ASADA de Santa Rosa no desinfectan el agua de una manera empírica, pues se ha realizado inversión en dosificadores, capacitación de personal y una calibración inicial para los equipos, además de acuerdo con información consultada previa a la investigación, se cuenta con permiso de funcionamiento sanitario y está registrada ante el MINAE. No obstante, de acuerdo con los instrumentos y las entrevistas realizadas, estos sistemas poseen un riesgo alto en su infraestructura y operación, debido a que se están dejando de lado aspectos críticos como las mediciones periódicas de distintos parámetros (caudales, cloro residual libre, temperatura, pH), registros eficientes para sistematizar información, así como ausencia de equipo de protección y espacios para el almacenamiento de las pastillas desinfectantes.

Se determina que los resultados obtenidos de los análisis de calidad de agua presentan un cumplimiento satisfactorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en 7 de los 10 puntos muestreados, indicando un alto cumplimiento de

la normativa nacional además de otras normas internacionales consultadas. Además, de acuerdo con el IRCACH, los tres puntos con niveles de riesgo intermedio y alto correspondientes a las nacientes de agua obtienen esta clasificación principalmente por el incumplimiento del cloro residual libre así como por la presencia de coliformes totales y *E.Coli*, indicando contaminación en las tres nacientes y evidenciando una importancia real de aplicar adecuadamente la desinfección y monitoreo de agua para asegurar la potabilidad del agua y no comprometer el resto del sistema de abastecimiento.

Las dos nacientes estudiadas para la demanda de cloro no presentan un punto de quiebre definido, debido a la poca concentración de materia orgánica y compuestos oxidables o la baja sensibilidad del equipo utilizado el cual no permitió una detección de máximos y mínimos en la curva resultante por las unidades utilizadas, sin embargo, a pesar de no obtenerse el comportamiento esperado, se puede definir una demanda de cloro para cada una de las nacientes basada en la ecuación de las curvas obtenidas. Adicionalmente, se demuestra que existe una diferencia significativa entre el consumo de cloro de ambas nacientes, requiriendo tratamientos diferenciados al dosificar y que por medio de las pruebas de comportamiento de cloro residual en toda la extensión del sistema de abastecimiento, se determina que no existe una diferencia significativa en la disminución de la concentración de cloro residual entre los tanques de almacenamiento y la red de distribución.

Se define una propuesta de desinfección dinámica en una hoja de cálculo para los operarios, que considera la posible variación del caudal de entrada a los dosificadores de la ASADA, la dosis de cloro residual libre deseada por el operador y la demanda de cloro determinada para cada naciente, generando una cantidad de pastillas semanales teóricas que diferían en la mayoría de los escenarios planteados de la cantidad de pastillas utilizadas actualmente, demostrando que es necesario un ajuste a la dosis utilizada por la ASADA para optimizar la desinfección de agua.

Con el taller de divulgación de resultados se cumplen de manera favorable los objetivos propuestos, permitiendo un acercamiento interdisciplinario entre la academia y la administración de la ASADA para la toma de futuras decisiones y mejoras a favor

de la calidad del servicio para la comunidad, además, fue un espacio para que los presentes pudieran ampliar sus conocimientos sobre la desinfección del agua y compartir estos conocimientos con otras personas, evidenciando la importancia de este tipo de estudios para la gestión de la seguridad del agua de en los acueductos, así como en el desarrollo de planes de seguridad del agua.

Finalmente, se concluye que si existe un impacto directo por parte de la frecuencia y dosificación óptima en parámetros de calidad de agua como el cloro residual y la presencia de microorganismos patógenos debido a que en los puntos antes del clorador se cuenta con concentraciones de CT y *E.Coli*, los cuales son eliminados posterior a la desinfección, en cuanto al cloro residual, este es sensible a la cantidad de pastillas utilizadas, la frecuencia con la que estas se colocan e inclusive al caudal que este entrando, aumentando o disminuyendo su concentración en el agua.

## **5.2 Recomendaciones**

La implementación de una medición de caudal más precisa por parte de la ASADA es fundamental debido a que solo se puede brindar una dosis adecuada al considerar cuánta agua está entrando al dosificador. Dicha determinación se puede realizar por medio de aforos semanales con instalaciones de salidas de agua laterales previas a la entrada del dosificador para facilitar la toma de agua, o por medio de la instalación de medidores de caudal como rotámetros.

Se recomienda monitorear el cloro residual libre en los tanques y algunos puntos en la red de distribución, de manera que se pueda corroborar que los dosificadores están trabajando de manera adecuada y en caso de que no, se puedan tomar medidas correctivas de inmediato. En conjunto con el monitoreo, los sistemas de registros internos podrán mejorar con la inclusión de datos de medición de caudal y cloro residual libre, de manera que se le pueda dar más trazabilidad a las acciones tomadas por la ASADA y también crear una base de datos para futuras investigaciones.

También es necesario el acondicionamiento de un espacio para que el fontanero pueda almacenar adecuadamente las pastillas desinfectantes, además de que

pueda tener su equipo de protección debidamente organizado y así pueda utilizarlo con una mayor frecuencia.

Se sugiere incorporar el análisis de la desinfección realizado dentro del Plan de Seguridad del Agua que está realizando la ASADA de Santa Rosa para que en el componente de desinfección se gestionen con seguridad los puntos críticos que se encuentren.

Finalmente, para futuras investigaciones es recomendable considerar otros factores que puedan ayudar a optimizar o robustecer futuras propuestas de desinfección, por ejemplo la opinión de la población en cuanto a parámetros estéticos de olor y sabor, aspectos técnicos como los tiempos de contacto ideales, el decaimiento de cloro, o ambientales como la presencia de sedimentos y riesgos potenciales para las fuentes de agua, de manera que se pueda fortalecer el trabajo interdisciplinario y se den más acercamientos como el que se tuvo en esta investigación.

## **CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) El Mahdy, C. I. Importance of Fresh Water for Livestock. *Encycl. World's Biomes*, **2020**, 29–34. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11964-5>.
- (2) Du, Y.; Lv, X. T.; Wu, Q. Y.; Zhang, D. Y.; Zhou, Y. T.; Peng, L.; Hu, H. Y. Formation and Control of Disinfection Byproducts and Toxicity during Reclaimed Water Chlorination: A Review. *J. Environ. Sci. (China)*, **2017**, *58*, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.013>.
- (3) UNESCO. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático <https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020> (accesado el 3 de abril de 2021).
- (4) Espinoza, A.; Morera, A.; Mora, D.; Torres, R. *Calidad Del Agua Potable En Costa Rica : Situación Actual y Perspectivas*; Ministerio de Salud, Costa Rica, 2004, 40.

- (5) Alvarado, D. M.; Portuguez, C. *AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO Y SANEAMIENTO EN COSTA RICA AL 2019: BRECHAS Y DESAFÍOS AL 2023*; AyA, Costa Rica, 2020.
- (6) Mora, D.; Portuguez, C. F. Agua Para Consumo Humano y Saneamiento En Costa Rica Al 2016. Metas Al 2022 y Al 2030. *Rev. Tecnol. en Marcha*, **2018**, 31 (2), 72. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3625>.
- (7) Sánchez-Gutiérrez, R.; Benavides-Benavides, C.; Chaves-Villalobos, M.; Quirós-Vega, J. Calidad Del Agua Para Consumo Humano En Una Comunidad Rural: Caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica. *Rev. Tecnol. en Marcha*, **2020**, 33, 3–16. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4165>.
- (8) Sánchez-Gutiérrez, R.; Mena-Rivera, L.; Sánchez-Murillo, R.; Fonseca-Sánchez, A.; Madrigal-Solís, H. Hydrogeochemical Baseline in a Human-Altered Landscape of the Central Pacific Coast of Costa Rica. *Environ. Geochem. Health*, **2020**, 42 (9), 2685–2701. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00501-5>.
- (9) Presidente de la República y Ministerio de Salud. *Decreto N° 38924-S: Reglamento Para La Calidad Del Agua Potable*; Costa Rica, 2015.
- (10) Mora, D.; Jimena, A.; Gutiérrez, O.; Rivera, P.; Yuliana, N.; Castro, S.; Zúñiga, L.; David, Z.; Bolaños, C.; Campos, A. U. *Índice de Riesgo de La Calidad Del Agua Para Consumo Humano En Costa Rica (IRCACH)*; AyA, Costa Rica, 2018; Vol. 2.
- (11) Mazhar, M. A.; Khan, N. A.; Ahmed, S.; Khan, A. H.; Hussain, A.; Rahisuddin; Changan, F.; Yousefi, M.; Ahmadi, S.; Vambol, V. Chlorination Disinfection By-Products in Municipal Drinking Water – A Review. *J. Clean. Prod*, **2020**, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123159>.
- (12) Yang, M.; Zhang, X. Current Trends in the Analysis and Identification of Emerging Disinfection Byproducts. *Trends Environ. Anal. Chem*, **2016**, 10, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2016.03.002>.

- (13) Mora Alvarado, D. A.; Araya García, A. Estado Del Agua Para Consumo Humano y Saneamiento En Costa Rica Al Año 2007. *Rev. Costarric. Salud Pública*, **2008**, 17 (32), 16–34.
- (14) Ordoñez, J. Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Soc. Geogr. Lima*, **2011**, 2–44.
- (15) Cerón, L. M.; Sarria, J. D.; Torres, J. S.; Soto-Paz, J. Groundwater: Trends and Scientific Development [Agua Subterránea: Tendencias y Desarrollo Científico]. *Inf. Tecnol*, **2021**, 32 (1), 47–56.
- (16) Losilla, M.; Rodríguez, H.; Schosinsky, G.; Stimson, J.; Bethune, D. *Los Acuíferos Volcánicos y El Desarrollo Sostenible En América Central*; Editorial Universidad de Costa Rica, 2001.
- (17) Sandoval, L. F.; Zurvia-flores, J. R. R.; Bruno, A. Sistema Para Control y Gestión de Redes de Agua Potable de Dos Localidades de México. *Ing. Hidráulica y Ambient*, **2013**, 34 (1), 112–126.
- (18) Monge, E.; Paz J., L.; Ovares, C. *Transparencia y Rendición de Cuentas En Las ASADAS*, 2013, 56.
- (19) Soto-Córdoba, S. M.; Gaviria-Montoya, L.; Pino-Gómez, M. Situación de La Gestión Del Agua Potable En Las Zonas Rurales de La Provincia de Cartago, Costa Rica. *Rev. Tecnol. en Marcha*, **2016**, 29 (8), 67. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2986>.
- (20) Diersing, N. Water Quality : Frequently Asked Questions. *Florida Keys Natl. Mar. Sanctuary*, **2009**, 8, 5–6.
- (21) Meybeck, M.; Peters, N. E.; Chapman, D. V. Water Quality. *Encycl. Hydrol. Sci*, **2005**, 1–13.
- (22) Marín, L. Desinfección Del Agua: Sistemas Utilizados En AyA. *Hidrogénesis*, **2007**, 5 (1), 35–46.
- (23) Spellman, F.; Drinan, J. *Manual Del Agua Potable*; Editorial ACRIBIA, S.A,

2000.

- (24) EPA. Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales Humedales de Flujo Subsuperficial. *United States Environ. Prot. Agency, (Us Epa)*. **2000**, 64, 13.
- (25) EPA. *Water Treatment Manual : Disinfection*; 2011.
- (26) Pichel, N.; Vivar, M.; Fuentes, M. The Problem of Drinking Water Access: A Review of Disinfection Technologies with an Emphasis on Solar Treatment Methods. *Chemosphere*, **2019**, 218, 1014–1030. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.205>.
- (27) Ibrahim, M. A. S.; Macadam, J.; Autin, O.; Jefferson, B. Evaluating the Impact of LED Bulb Development on the Economic Viability of Ultraviolet Technology for Disinfection. *Environ. Technol*, **2014**, 35 (4), 400–406. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.829858>.
- (28) Gelete, G.; Gokcekus, H.; Ozsahin, D. U.; Uzun, B.; Gichamo, T. Evaluating Disinfection Techniques of Water Treatment. *Desalin. Water Treat*, **2020**, 177, 408–415. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25070>.
- (29) Calderón, J. L. ÁCIDO HIPOCLOROSO (HOCl) “Una Nueva Alternativa En Antisepsia y Desinfección Desarrollada En Colombia.” *Congr. del Col. Nac. Bacteriólogos*, **2010**.
- (30) American Chemistry Council. Calidad Del Agua: Desinfección Efectiva <https://chlorine.americanchemistry.com/Calidad-Del-Agua-Desinfeccion-Efectiva/> (accesado el 23 de mayo de 2021).
- (31) Srivastav, A. L.; Patel, N.; Chaudhary, V. K. Disinfection By-Products in Drinking Water: Occurrence, Toxicity and Abatement. *Environ. Pollut*. **2020**, 267, 115474. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115474>.
- (32) Olmedo-Sanchez, M. T. Subproductos de La Desinfección Del Agua Por El Empleo de Compuestos de Cloro . Efectos Sobre La Salud. *Hig. Sanid. Ambient*, **2008**, 342, 335–342.

- (33) EPA. *Manual Del Inspector - Cómo Realizar Inspecciones Sanitarias En Pequeños Sistemas de Agua*; 2001.
- (34) OPS. *Guía Para La Selección de Sistema de Desinfección*; 2007.
- (35) Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento. *Manual de La Cloración. Com. Cent. Saneam, 1984*, 1–32.
- (36) Ramírez, L. F.; Barrera, J. J. *Programa Agua y Saneamiento Para La Prosperidad*; 2015.
- (37) Municipalidad de Poás - Datos del Cantón <https://poasdigital.go.cr/index.php/m-conozcanos/mn-micanton/mn-historiacanton> (accesado el 2 de mayo de 2021).
- (38) Censos Nacionales. *Indicadores Cantonales*; 2011.
- (39) Cantón de Poás – Guías Costa Rica <https://guiascostarica.com/poas/> (accesado el 2 de mayo de 2021).
- (40) APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed.; American Public Health Association: Washington, DC, 2017.
- (41) Vidal, M.; Suárez, M.; Gómez, R.; Sánchez, M.; Ramírez, L. *Parámetros Físico-Químicos. I: La Composición Iónica Del Agua*; España.
- (42) Mageshkumar, P.; Vennila, G. Assessment of Errors in Water Quality Data Using Ion Balancing Methods - A Case Study from Cauvery River, South India. *Indian J. Geo-Marine Sci*, **2020**, 49 (1), 57–62.
- (43) Harris, D. C. *Análisis Químico Cuantitativo*, 3ra Edición.; Editorial Reverté: España, 2007.
- (44) Pentair. CHLORINE/BROMINE FEEDERS. 2020, p 2.
- (45) Solsona, F.; Méndez, J. Desinfección de Agua. *Cent. Panamericano Ing. Sanit. y Ciencias del Ambient*, **2002**, 60–98.
- (46) Chauca, C. A. F.; Orozco, C. L. S. “Diseño E Implementación De Un Sistema

- Automatizado Para La Dosificación De Cloro En El Tratamiento De Agua Potable En La Comunidad San Vicente De Lacas”.Tesis de grado, Ecuador, 2012.
- (47) Sáenz, M.; Vargas, A. *Sistemas de Cloración En El Suministro de Agua Potable En Las ASADAS de Costa Rica*.
- (48) Mora, S. Evaluación de Las Principales Tecnologías Utilizadas En Costa Rica Para La Desinfección de Agua, 2011.
- (49) OxyChem Corporation. *ACL ® 90 PLUS CHLORINATING COMPOSITION*; 2016.
- (50) OxyChem. *SALES SPECIFICATION ACL ® 90 Disinfecting Tablets*; 2020.
- (51) WHO. *Principles and Practices of Drinking-Water Chlorination*; 2017.
- (52) OPS. *Guía Para La Operación Y Mantenimiento De Sistemas De Desinfección*; 2007.
- (53) OPS. *Procedimientos Para La Operación y Mantenimiento de Captaciones y Reservorios de Almacenamiento*; 2004.
- (54) Villalobos, M. M. C. Evaluación y Propuesta de Mejora Del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable de La ASADA Paquera de Puntarenas. Tesis de Licenciatura, Tecnológico de Costa Rica, 2019.
- (55) Gaviria-Montoya, L.; Pino-Gómez, S. *EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA ASADA DE COT, COT, OREAMUNO, DESDE UNA PERSPECTIVA DEL USO SOSTENIBLE DEL RECURSO HÍDRICO*; Cartago, 2016.
- (56) OMS. *Guías Para La Calidad Del Agua de Consumo Humano: Cuarta Edición Que Incorpora La Primera Adenda*; Organización Mundial de la Salud, 2011, 4, 608.
- (57) Craig, S.T.; D’Abramo, L. R. *Managing High PH in Freshwater Ponds | The Fish Site*. SRAC, 2008.
- (58) Davies-Colley, R. J.; Smith, D. G. Turbidity, Suspended Sediment, and Water

- Clarity: A Review. *J. Am. Water Resour. Assoc*, **2001**, 37 (5), 1085–1101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>.
- (59) Yang, X.; Liang, S.; Hu, J.; Xia, J. Application Analysis of Conductivity in Drinking Water Quality Analysis. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, **2021**, 784 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/784/1/012028>.
- (60) Mirjam-Blokker, E. J.; Pieterse-Quirijns, E. J. Modeling Temperature in the Drinking Water Distribution System. *J. Am. Water Works Assoc*, **2013**, 105 (1), 35–36. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0011>.
- (61) Li, X.; Gu, D. M.; Qi, J. Y.; Ukita, M. Z. Modeling of Residual Chlorine in Water Distribution System. *J. Environ. Sci*, **2003**, 15 (1), 136.
- (62) Steininger, J. M. *PPM or ORP : Which Should Be Used ?*; Swim. Pool Age Spa Merch, 1985.
- (63) Hussain, I.; Shakeel, M.; Faisal, M.; Soomro, Z. A.; Hussain, M.; Hussain, T. Distribution of Total Dissolved Solids in Drinking Water by Means of Bayesian Kriging and Gaussian Spatial Predictive Process. *Water Qual. Expo. Heal.* **2014**, 6 (4), 177–185. <https://doi.org/10.1007/s12403-014-0123-9>.
- (64) OMS. *Guías Para La Calidad Del Agua Potable*; 2006.
- (65) Kumar, M.; Puri, A. A Review of Permissible Limits of Drinking Water. *Indian J. Occup. Environ. Med.* **2012**, 16 (1), 40–44. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.99696>.
- (66) Sanchez-Molina, V.; Solís-Montiel, E.; Valdés-González, J.; Fernández-Araya, J.; Coto-Campos, J.; Mendelewicz-Goldwaig, M. *Química Analítica Experimental*; EUNA, 2016.
- (67) Rose, S.; Long, L. *Monitoring Dissolved Oxygen in Ground Water: Some Basic Considerations*. GWMR, 1988.
- (68) Pérez-López, E. Control de Calidad En Aguas Para Consumo Humano En La Región Occidental de Costa Rica. *Rev. Tecnol. en Marcha*, **2016**, 29 (3), 3.

<https://doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>.

- (69) Addy, K.; Green, L.; Herron, E. PH and Alkalinity. *Univ. Rhode Isl*, **2004**, 1–4.
- (70) Juntakut, P.; Haacker, E. M. K.; Snow, D. D.; Ray, C. Risk and Cost Assessment of Nitrate Contamination in Domesticwells. *Water*, **2020**, *12* (2), 6–8. <https://doi.org/10.3390/w12020428>.
- (71) Winton, E. .; Tardiff, R. .; McCabe, L. Nitrate in Drinking Water. *J. / Am. Water Work. Assoc*, **1971**, *63* (2), 95–98. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1971.tb04035.x>.
- (72) Chowdhury, S. H.; Kehew, A. E.; Passero, R. N. Correlation between Nitrate Contamination and Ground Water Pollution Potential. *Ground Water*, **2003**, pp 735–745. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02415.x>.
- (73) Sallenave, R. *Nitrate in Drinking Water*, 2017.
- (74) Nestler, A.; Berglund, M.; Accoe, F.; Duta, S.; Xue, D.; Boeckx, P.; Taylor, P. Isotopes for Improved Management of Nitrate Pollution in Aqueous Resources: Review of Surface Water Field Studies. *Environ. Sci. Pollut. Res*, **2011**, *18* (4), 519–533. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0422-z>.
- (75) WHO. *Sulphate in Drinking-Water*, 2004.
- (76) Moreno, P. Environmental Impact and Toxicology of Sulphate, **2009**, *20* 130, 1–10.
- (77) Van Der Aa, M. Classification of Mineral Water Types and Comparison with Drinking Water Standards. *Environ. Geol.* **2003**, *44* (5), 554–563. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0791-4>.
- (78) Meenakshi, R. C.; Maheshwari. Fluoride in Drinking Water and Its Removal. *J. Hazard. Mater.* **2006**, *137* (1), 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.024>.
- (79) Vannucci, L.; Fossi, C.; Quattrini, S.; Guasti, L.; Pampaloni, B.; Gronchi, G.; Giusti, F.; Romagnoli, C.; Cianferotti, L.; Marcucci, G.; Brandi, M. L. Calcium

Intake in Bone Health: A Focus on Calcium-Rich Mineral Waters. *Nutrients* **2018**, *10* (12), 1–12. <https://doi.org/10.3390/nu10121930>.

- (80) Kozisek, F. *Health Risk from Drinking Demineralized Water*, 2004.
- (81) Kozisek, F. Regulations for Calcium, Magnesium or Hardness in Drinking Water in the European Union Member States. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **2020**, *112* (January), 104589. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104589>.
- (82) Garrison, G. E.; Ader, O. L. Sodium in Drinking Water. *Arch. Environ. Health* **1966**, *13* (5), 551–553. <https://doi.org/10.1080/00039896.1966.10664616>.
- (83) World Health Organization (WHO). Potassium in Drinking Water. Background Document for Preparation of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. *World Heal. Organ*, **2009**, 1–5.
- (84) Maheux, A. F.; Boudreau, D. K.; Bisson, M. A.; Dion-Dupont, V.; Bouchard, S.; Nkuranga, M.; Bergeron, M. G.; Rodriguez, M. J. Molecular Method for Detection of Total Coliforms in Drinking Water Samples. *Appl. Environ. Microbiol.* **2014**, *80* (14), 4074–4084. <https://doi.org/10.1128/AEM.00546-14>.
- (85) Ajiboye, T. O.; Babalola, S. O.; Onwudiwe, D. C. Photocatalytic Inactivation as a Method of Elimination of e. Coli from Drinking Water. *Appl. Sci.* **2021**, *11* (3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/app11031313>.
- (86) Auquilla, C.; Astorga, Y.; Jiménez, F. Influence of the Land Use in the Quality of the Water in the Subwatershed of the River Jabonal, Costa Rica. *Recur. Nat. y Ambient.* **2005**, *48* (48), 81–92.
- (87) Ordóñez-Ramirez, V. Contaminación Del Agua. *Ingenius* **2007**, *20* (1), 1–3. <https://doi.org/10.17163/ings.n1.2007.04>.
- (88) Morales, S. H.; Zuñiga, C. I. Importancia de La Cloración Del Agua : Sitios de Abastecimiento Con Presencia de Bacterias Patógenas. *ENF INF MICROBIO*, **2019**, *39* (3), 86–92.
- (89) Kumar, N. Drinking Water Quality Management through Correlation Studies

among Various Physico - Chemical Parameters : A Case Study, **2010**, 1 (2), 253–259.

- (90) Gómez-Soto, A.; Payán-López, J. Evaluación de Las Condiciones de Dosificación de Cloro En La Planta de Tratamiento Del Acueducto Cestillal-El Diamante “Acucesdi”. Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2008.
- (91) Ibarquen-Castañeda, M.; Bernal-Mejía, L. M. Establecer La Demanda de Cloro En El Acueducto Tribunas Córcega de La Ciudad de Pereira. Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2008.
- (92) Perales, E. Determinación de La Dosificación Óptima de Cloro En Relación Con Cloro Residual En El Tratamiento de Agua Para Consumo En La Urbanización Santa Lucia - Morales. Tesis de grado, Perú, 2020.
- (93) Games, P. A.; Keselman, H. J.; Rogan, J. C. Simultaneous Pairwise Multiple Comparison Procedures for Means When Sample Sizes Are Unequal. *Psychol. Bull*, **1981**, 90 (3), 594–598. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.90.3.594>.
- (94) Searle, S. R.; Speed, F. M.; Milliken, G. A. Population Marginal Means in the Linear Model: An Alternative to Least Squares Means. *Am. Stat*, **1980**, 34 (4), 216–221. <https://doi.org/10.1080/00031305.1980.10483031>.
- (95) Gonzalez, A. Desinfección Del Agua, Mediante El Uso Del Ácido Tricloroisocianúrico. Tesis de maestría, Instituto tecnológico de Costa Rica, 2011.

# ANEXOS

**Anexo 1.** Protocolo para la determinación de la demanda de cloro en campo.

## 1. Equipos o instrumentos requeridos

- Balanza semi-analítica
- Balanza analítica
- Bureta de vidrio de 50 mL
- Desionizador de agua

## 2. Reactivos, patrones y materiales de referencia

- Agua desionizada
- Ácido sulfúrico concentrado
- Almidón (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>
- Disolución del Tiosulfato de sodio 0.1 N
- Disolución de almidón al 1%
- Disolución de ácido sulfúrico 1:3

## 3. Descripción del procedimiento

- Medir 0.1800 g de muestra en un erlenmeyer de 500 mL. Realice este punto por muestra.
- Adicionar 200 mL de agua desionizada con una probeta, tapar y poner en agitación hasta disolver.
- Añadir 10 mL de la disolución de ácido sulfúrico 1:3 al erlenmeyer y agitar, seguido agregar al erlenmeyer 2.5 g de KI, tapar y agitar hasta disolver.
- Titular inmediatamente con el tiosulfato 0.1 N hasta llevar al color amarillo paja
- Agregar 1 mL de la disolución de almidón, continuar valorando hasta el cambio de color azul pase a incoloro
- Repetir el procedimiento siete veces

## 4. Cálculo de resultado

$$\%Cl_2 = \frac{A \times N \times 35.457}{1000 \times \text{Peso de la muestra en gramos}} \times 100$$

A= mL de titulante gastados en la muestra

N= Normalidad de la disolución de tiosulfato de sodio

## **5. Referencias Bibliográficas**

APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 4500-Cl. 21<sup>st</sup> Edition. 2005.

## **Anexo 2. Procedimiento para la determinación de la demanda de cloro en campo**

### **1. Equipos o instrumentos requeridos**

- Balanza analítica
- Tubos de ensayo con tapa
- 16 recipientes de plástico de 20 L
- Probeta de plástico de 500 mL
- Probeta de plástico de 25 mL
- Medidor de cloro residual libre en campo (Hanna Instruments)

### **2. Reactivos, patrones y materiales de referencia**

- Pastilla de ácido tricloroisocianúrico pulverizada
- Sobres de 0.1 g de reactivo para cloro residual libre por el método DPD en campo (Hanna Instruments)
- Agua libre de cloro

### **3. Descripción del procedimiento**

- Medir en tubos de ensayo con tapa masas de 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 g de ácido tricloroisocianúrico al 0.1 mg en la balanza analítica.
- Tapar todos los tubos y almacenar en un lugar seco y oscuro para llevar posteriormente al campo.
- En el campo, llenar 8 recipientes de plástico de 20 L hasta su máxima capacidad con el agua de la naciente a analizar.
- Adicionar a cada uno de los recipientes uno de los tubos de ensayo previamente pesados, no olvide etiquetarlos adecuadamente.
- Agitar vigorosamente de forma que todo el sólido se disuelva dentro del

recipiente.

- Dejar reposar y esperar 30 minutos de forma que se cumpla con un tiempo de contacto adecuado, no olvide agitar el recipiente cumplidos 15 minutos.
- Mientras espera, llene los otros 8 recipientes con agua, sin embargo, hágalo hasta un 90% de capacidad.
- Una vez que el tiempo se haya completado, tome una alícuota de 500 mL de la primera línea de recipientes y deposítela una por una en sus respectivos recipientes semillenos.
- Afore con agua hasta su capacidad máxima
- Agite hasta homogenizar el contenido de cada uno de los recipientes.
- Comience a medir el cloro residual libre en cada uno de los recipientes, realizando la medición por triplicado, para esto, con la ayuda de la probeta de 25 mL tome un poco del agua y llene las celdas del medidor. Utilice una de ellas como blanco y La a otra adiciónale uno de los sobres con reactivo, espere 1 minuto y realice la medición fotométrica de la muestra.
- Repita este procedimiento para todos los patrones, no olvide anotar las lecturas obtenidas.
- Con el promedio de las 3 mediciones y la concentración exacta de cada uno de los patrones, realice una gráfica de dosis de cloro añadida vs concentración de cloro residual libre.

#### **4. Referencias bibliográficas**

APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 4500-Cl. 21<sup>st</sup> Edition. 2005.

**Anexo 3.** Instrumentos de sistematización de información primaria requerida basados en documentos de la EPA, OMS y guías SERSA.

**Instrumento 1.** Formulario de información preliminar sobre el sistema de abastecimiento de agua potable.

<b>Sistema de abastecimiento de agua potable</b>		
<b>A. Localización y especificaciones generales</b>		
Registro de la información básica del sistema de abastecimiento.		
Nombre del sistema de abastecimiento	Asociación Administradora de acueducto y alcantarillado de Santa Rosa	
Fecha de inspección	13/08/2021	
Ubicación (provincia, cantón, distrito, coordenadas, dirección exacta)	Alajuela, Poás, San Rafael, diagonal al gimnasio de deportes	
Ente administrador	ASADA	
Año de construcción del sistema de abastecimiento	13 de junio 1998	
Número de abonados	423	
Número aproximado de población abastecida por el sistema	Aproximadamente 1692 usuarios	
Nombre de las comunidades abastecidas por el sistema	Calle Liles, Calle central, Ratoncillal 1 y 2 y calle Rojas	
¿Se cuenta con un programa de Control de Calidad del Agua conforme al Reglamento Calidad del Agua Potable?	Si (X)	No ( )
¿Las Naciente o captaciones de agua están registradas en MINAE?	Si (X)	No ( )
¿El programa de control de calidad de agua vigente se encuentra vigente?	Si (X)	No ( )
¿El permiso sanitario de funcionamiento está vigente?	Si (X)	No ( )
¿Se llevan registros de los resultados de análisis de calidad de agua?	Si (X)	No ( )
<b>B. Información técnica del sistema</b>		
Registro de la información asociada a la composición del sistema de abastecimiento.		
Cantidad de nacientes o manantiales		
Nombre	Latitud	Longitud
Naciente Cabuyal	10° 7' 19'' N	84° 14' 23'' O
Naciente Bernardino	10° 7' 13'' N	84° 14' 35'' O
Naciente la Viuda	-	-
Cantidad de tanques de almacenamiento		
Nombre	Latitud	Longitud
Tanque Central	10° 6' 16'' N	84° 15' 47'' O
Tanque Ratoncillal	10° 5' 52'' N	84° 15' 47'' O
Tanque Granados 1	10° 6' 31'' N	84° 15' 29'' O

Tanque Granados 2		10° 6' 31'' N	84° 15' 29'' O
Tanque Soto 1		10° 7' 7'' N	84° 15' 14'' O
Tanque Soto 2		10° 7' 7'' N	84° 15' 14'' O
Tanque Quijote		-	-
Mecanismo de abastecimiento	Gravedad (X)	Bombeo ( )	Otro:
Tipo de captación	Agua superficial ( )	Naciente (X)	Pozo ( )
Sistema de desinfección	No se aplica ningún tratamiento ( )	Se aplica cloración (X)	Otro:
<b>C. Funcionalidad del sistema</b>			
Registro de la información referente al funcionamiento del sistema de abastecimiento. (Marque con una X la opción que corresponda. Si la respuesta es No, proporcione detalles como componentes defectuosos o faltantes, agua no disponible o limitada, entre otros)			
¿Está el agua actualmente disponible desde el manantial?		Si la respuesta es No, brinde detalles:	
Si (X)	No ( )		
¿La producción de agua apta para consumo humano es suficiente para cumplir las demandas actuales y futuras?		Si la respuesta es No, brinde detalles:	
Si (X)	No (X)		
¿Se conoce el caudal del sistema?		Si la respuesta es Si, brinde detalles:	El caudal es variable, por lo tanto, solo se cuenta con una aproximación
Si (X)	No ( )		


**Instrumento 2.** Entrevista al operador de la ASADA de Santa Rosa respecto al sistema de desinfección.

Entrevistado: Jose Antonio Álvarez Vega Cargo: Fontanero Fecha: 13/08/2022 Hora: 11:00 am

<b>Desinfección de agua</b>	
<b>A. Generalidades del proceso de desinfección.</b> En esta sección se solicita información relevante relacionada con el tipo de sistema de desinfección, funcionamiento, dosificador, frecuencia, entre otros.	
¿Qué sistema de desinfección utilizan para el tratamiento del agua?	Cloración con ácido tricloroisocianúrico
¿Cómo funciona el sistema de desinfección?	Semanalmente se colocan las pastillas dentro del dosificador y se dejan hasta la disolución parcial o total, el sistema es continuo
¿Quiénes son los encargados de realizar la desinfección?	El fontanero de la ASADA
¿Los encargados recibieron algún tipo de capacitación?	Si, recibió un curso de administrador para sistemas de acueductos y alcantarillados comunales del INA y un curso de cloración impartido por Continex.
¿Cuánto tiempo se lleva utilizando este sistema de desinfección?	Siempre se ha utilizado la cloración como sistema de desinfección.
¿El sistema de desinfección ha sufrido modificaciones? Si su respuesta es <b>Sí</b> por favor especifique	No
¿Cuántas veces a la semana se realiza el proceso de desinfección?	Cada semana

¿El sistema posee un residual de cloro en todas las redes principales de distribución?	Si
<b>B. Dosificación.</b> En esta sección se solicita información respecto al sistema de dosificación utilizado.	
¿Qué sistema de dosificación de cloro se utiliza?	Se utiliza un dosificador por erosión de pastillas
¿Cuánto tiempo se lleva utilizando el sistema de dosificación?	1 año
¿El sistema de dosificación ha sufrido modificaciones? Si su respuesta es <b>Sí</b> por favor especifique	Si, en 2019 se compraron los nuevos dosificadores para remplazar los antiguos
¿Qué cantidad de desinfectante clorado se utiliza?	En el dosificador de la naciente Cabuyal se agregan 7 pastillas cada 8 días, mientras que en el dosificador de la naciente Bernardino se agregan de 9 a 10 pastillas.
¿Se reflejan las dosis y cantidades totales usadas de desinfectante en los registros?	Si, llevan una bitácora
¿La dosis de cloro aplicada está relacionada con el caudal de la fuente?	Inicialmente un técnico de la empresa que vendió el dosificador se presentó 3 veces para calibrar el sistema, no obstante, no se toma en cuenta el caudal variable de la fuente.
¿Se mide y registra diariamente la temperatura y pH del agua en el punto de aplicación del cloro?	No se revisa
¿Han ocurrido interrupciones en el proceso de desinfección, si la respuesta es <b>Si</b> , especifique?	No
¿El dosificador se encuentra protegido y debidamente cubierto?	El de la naciente Cabuyal sí, pero el de la naciente Bernardino no.
<b>C. Manejo y almacenamiento de productos químicos.</b> En esta sección se solicita información sobre el manejo que recibe el desinfectante clorado, y como este es almacenado.	
¿Cómo se almacena el desinfectante clorado?	Las pastillas se almacenan en sus empaques originales, que en este caso corresponde a una cubeta con tapa, la cual es guardada dentro de la bodega del fontanero
¿Cómo se realiza el proceso de manejo y mezclado de la sustancia química?	Se cierra la válvula de flujo, se purga el aire del sistema y se coloca una a una las pastillas.
¿Se cuenta con equipo de seguridad apropiado en el punto de aplicación, así como equipo de protección personal?	No tienen equipo de protección

**Instrumento 3.** Guías de inspección del Sistema Estandarizado de Regulación de la Salud (SERSA) adaptadas a sistemas de cloración.

<b>Ficha de campo SERSA, sistema de cloración de Cabuyal</b>		
<b>A. Datos generales del sistema de cloración</b>		
Fecha: 7/6/2022 Nombre del acueducto: Asociación Administradora de acueducto y alcantarillado de Santa Rosa Encargado del acueducto: Alejandro Chacón Porras Teléfono: 24483783 Fecha de construcción del acueducto: 13 de junio 1998 Fecha de instalación del actual sistema de cloración: I semestre de 2019 Tipo de sistema de cloración: Gas cloro ( ) Electrólisis ( ) Pastillas por erosión (X) Otro ( ) Tipo de dosificación: Continua (X) Tiempos programados ( )		
<b>B. Diagnóstico del sistema de cloración</b>		
Identificación de los factores de riesgo para los sistemas de cloración	Si	No
1. ¿Se carece de una zona/caseta debidamente acondicionada para la preparación, aplicación o almacenamiento del cloro?	X	
2. ¿Carece el acueducto de bitácora de la dosificación del cloro (día/semana/mes/año)?		X
3. ¿Carece el operario de la capacitación necesaria para la preparación y aplicación de la cloración?		X
4. ¿Se carece del equipo de protección necesaria para el personal operativo del sistema de cloración?	X	
5. ¿Se carece del equipo para la medición de cloro residual?		X
6. ¿Se carece de registros de la concentración y del caudal de cloro aplicado?	X	
7. ¿Se carece de registros de los niveles de cloro residual en tanque(s) de almacenamiento o red de distribución?	X	
8. ¿Se carece de registros de caudal del agua a ser clorada (caudal que ingresa al tanque donde se homogeniza el cloro)?	X	
9. ¿Se carece de mantenimiento periódico del sistema de cloración?		X
10. Se carece de registros de medición de pH y temperatura diarios o semanales	X	
<b>Total de factores de riesgo identificados (“si” totales)</b>	6	4
Nivel de riesgo identificado (Número de X) Nulo = 0; Bajo 1-2; Intermedio 3-4; Alto 5-7; Muy alto 8-10	Alto	

**Ficha de campo SERSA, sistema de cloración de Bernardino Rodríguez**

**A. Datos generales del sistema de cloración**

Fecha: 7/6/2022  
 Nombre del acueducto: Asociación Administradora de acueducto y alcantarillado de Santa Rosa  
 Encargado del acueducto: Alejandro Chacón Porras  
 Teléfono: 24483783  
 Fecha de construcción del acueducto: 13 de junio 1998  
 Fecha de instalación del actual sistema de cloración: I semestre de 2019  
 Tipo de sistema de cloración:  
 Gas cloro ( ) Electrólisis ( ) Pastillas por erosión (X) Otro ( )  
 Tipo de dosificación:  
 Continua (X) Tiempos programados ( )



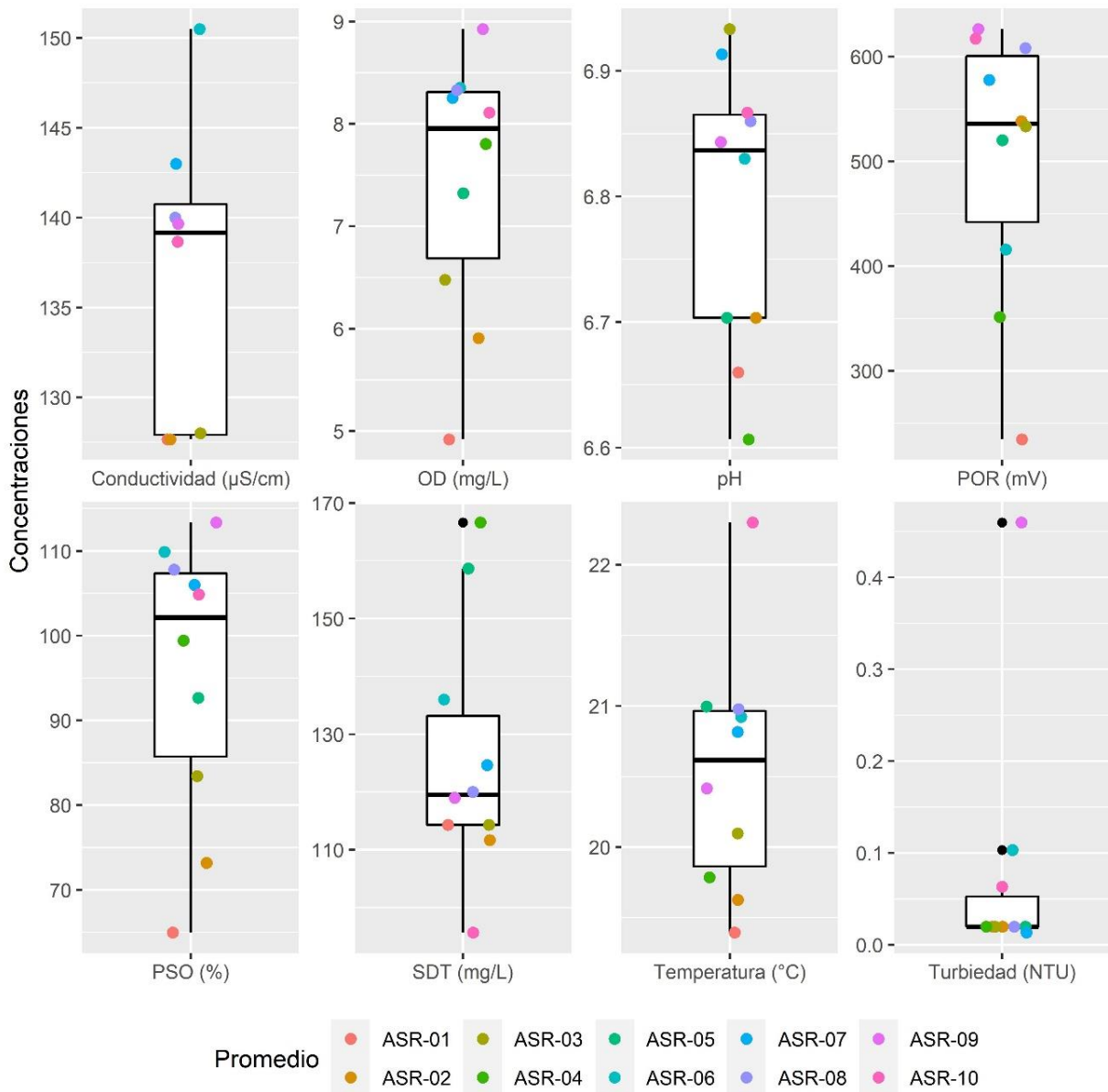
**B. Diagnóstico del sistema de cloración**

Identificación de los factores de riesgo para los sistemas de cloración	Si	No
1. ¿Se carece de una zona/caseta debidamente acondicionada para la preparación y aplicación del cloro?	X	
2. ¿Carece el acueducto de bitácora de la dosificación del cloro (día/semana/mes/año)?		X
3. ¿Carece el operario de la capacitación necesaria para la preparación y aplicación de la cloración?		X
4. ¿Se carece del equipo de protección necesaria para el personal operativo del sistema de cloración?	X	
5. ¿Se carece del equipo para la medición de cloro residual?		X
6. ¿Se carece de registros de la concentración y del caudal de la solución de cloro preparada y aplicada?	X	
7. ¿Se carece de registros de los niveles de cloro residual en tanque(s) de almacenamiento?	X	
8. ¿Se carece de registros de caudal del agua a ser clorada (caudal que ingresa al tanque donde se homogeniza el cloro)?	X	
9. ¿Se carece de mantenimiento periódico del sistema de cloración?		X
10. Se carece de registros de medición de pH y temperatura diarios o semanales	X	
<b>Total de factores de riesgo identificados (“si” totales)</b>	6	4
Nivel de riesgo identificado (Número de X) Nulo = 0; Bajo 1-2; Intermedio 3-4; Alto 5-7; Muy alto 8-10	Alto	

**Instrumento 4. Matriz de contactos**

No.	Nombre	Teléfono o celular	Correo electrónico	Cargo
1	Sonia Quirós Poveda	24483783	asadasantarosapoas@gmail.com	Asistente administrativa
2	Jose Antonio Álvarez Vega	88075994	-	Fontanero
3				
4				
5				

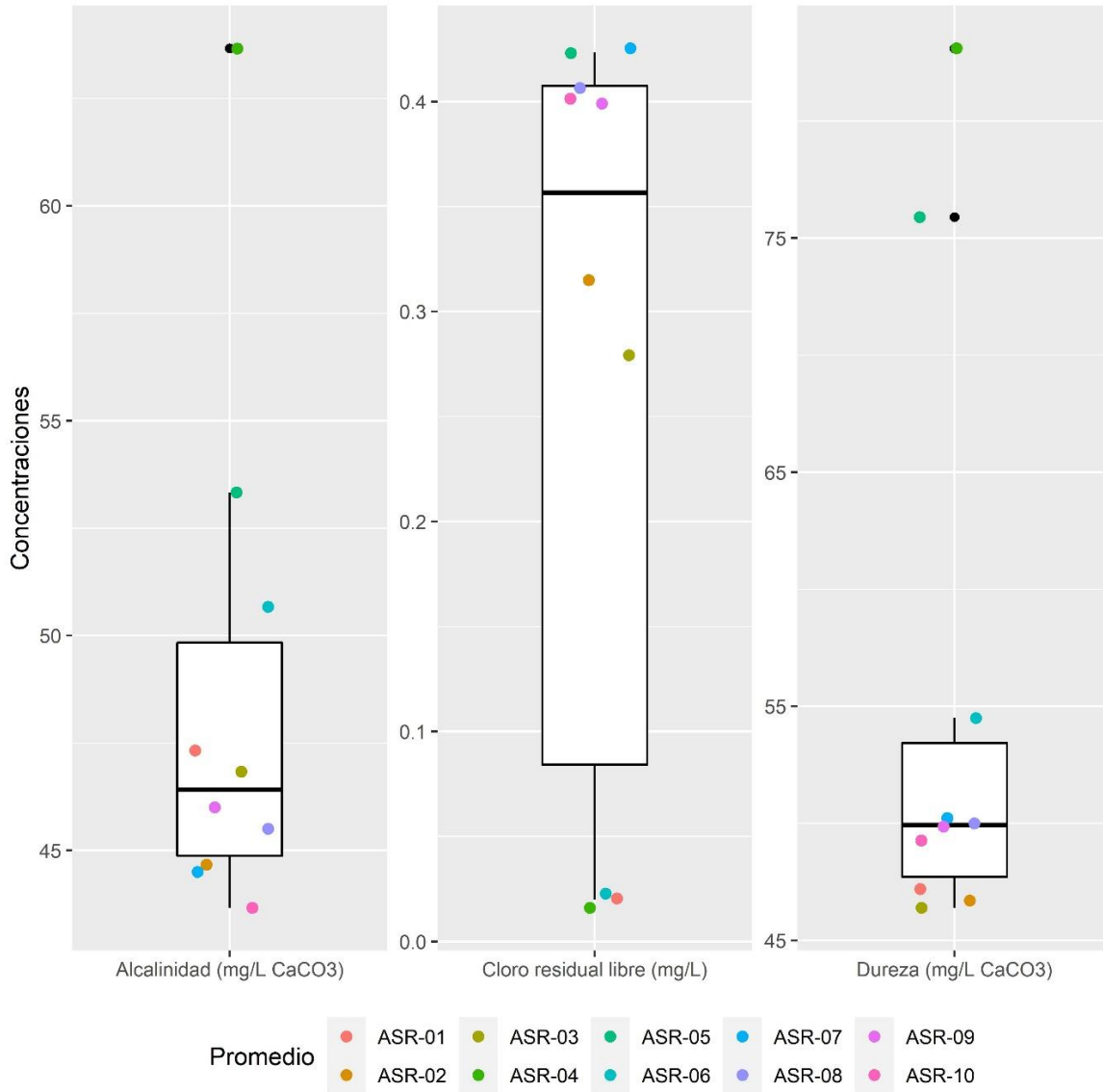
**Anexo 4.** Distribuciones promedio de los distintos parámetros obtenidos en las tres giras de muestreo de calidad de agua.



**Figura 11.** Valores promedio de las tres campañas de muestreo para cada uno de los parámetros físicos analizados.

Codificación:

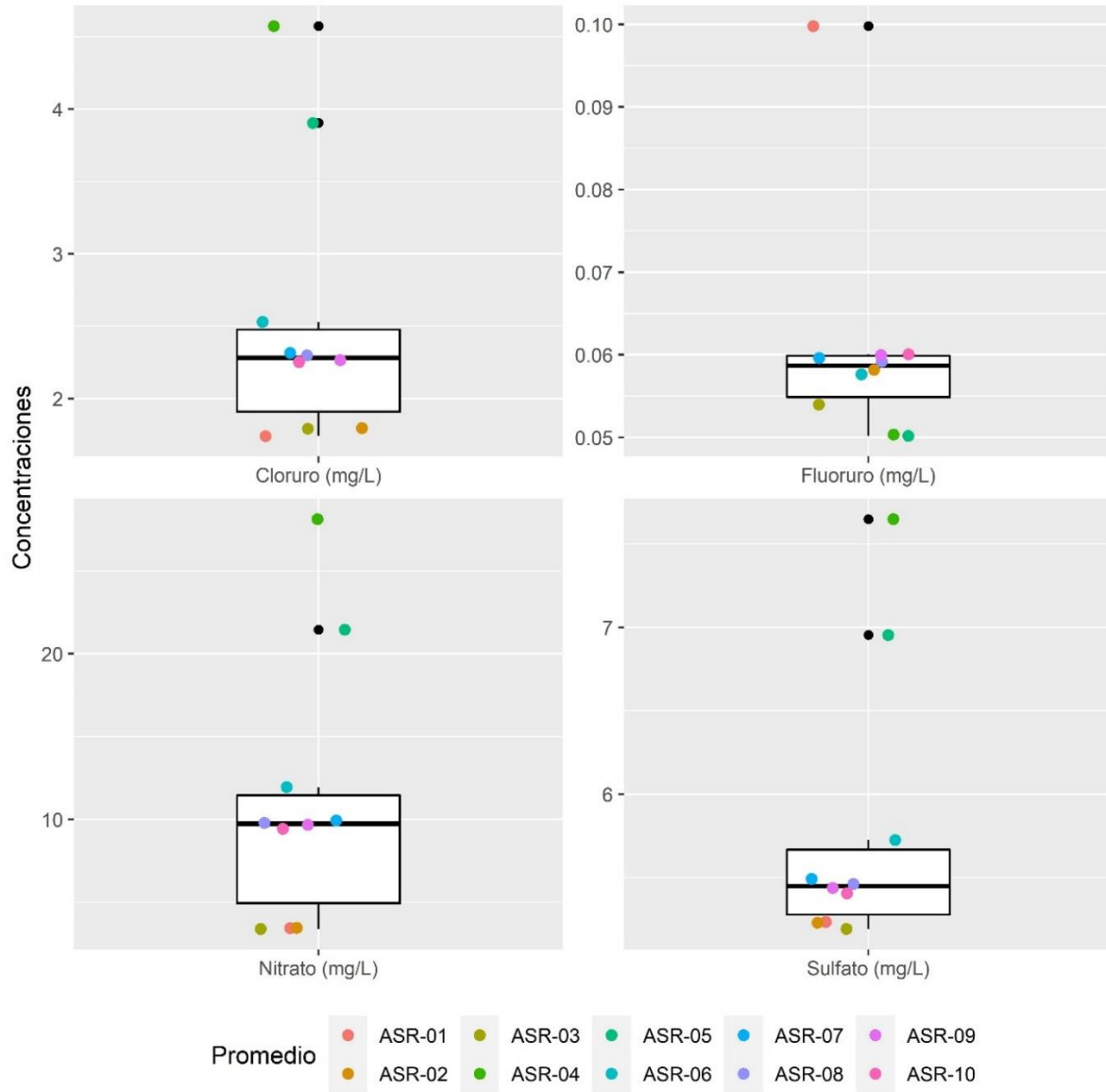
ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10
Naciente la Viuda	Tanque el Quijote	Red de distribución la Viuda	Naciente Cabuyal	Red de distribución Cabuyal	Naciente Bernardino	Tanque la Central	Red de distribución la Central	Tanque Ratoncillal	Red de distribución Ratoncillal



**Figura 12.** Valores promedio de las tres campañas de muestreo para cada uno de los parámetros químicos analizados.

Codificación:

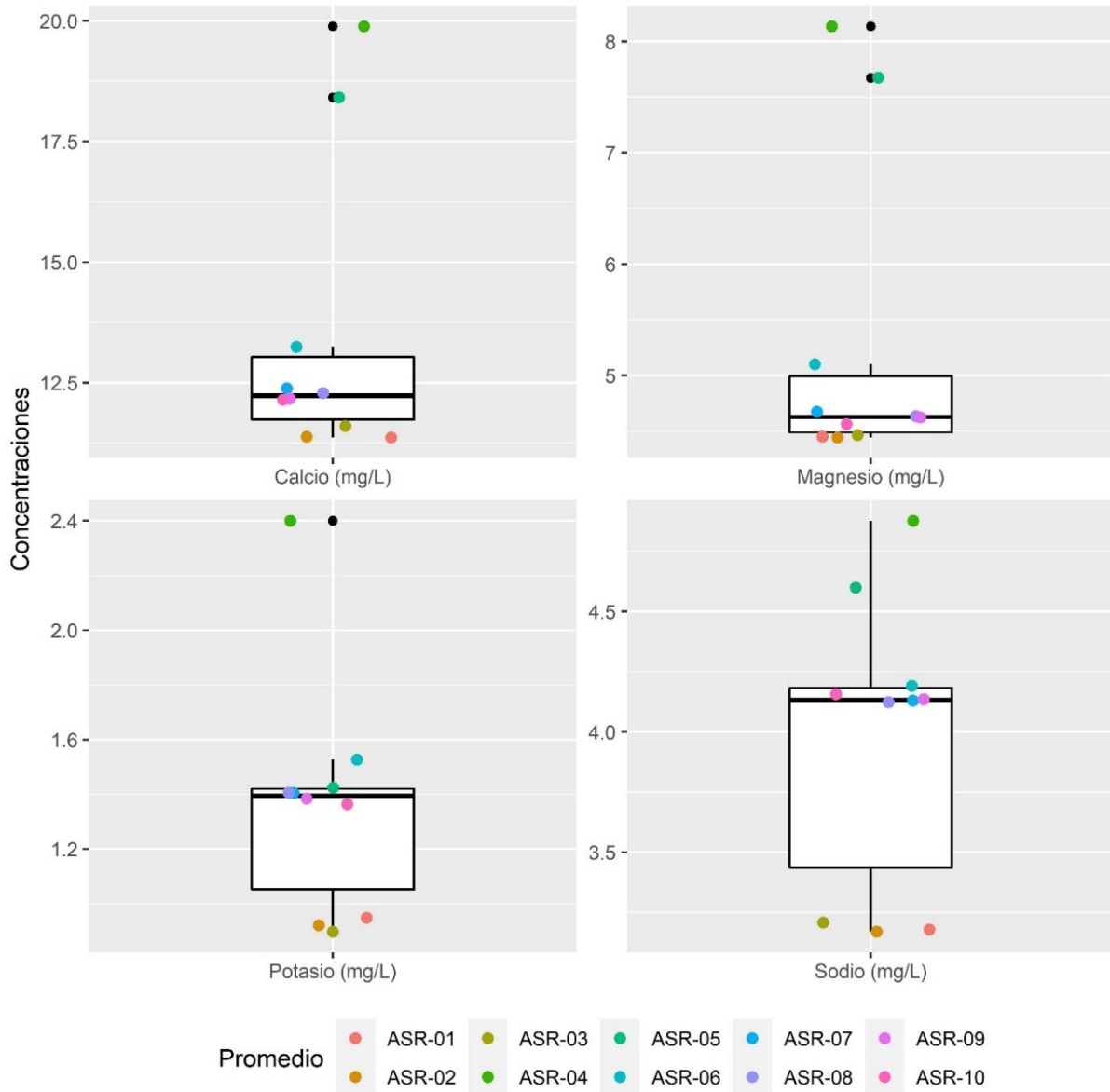
ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10
Naciente la Viuda	Tanque el Quijote	Red de distribución la Viuda	Naciente Cabuyal	Red de distribución Cabuyal	Naciente Bernardino	Tanque la Central	Red de distribución la Central	Tanque Ratoncilla	Red de distribución Ratoncilla



**Figura 13.** Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los aniones analizados.

Codificación:

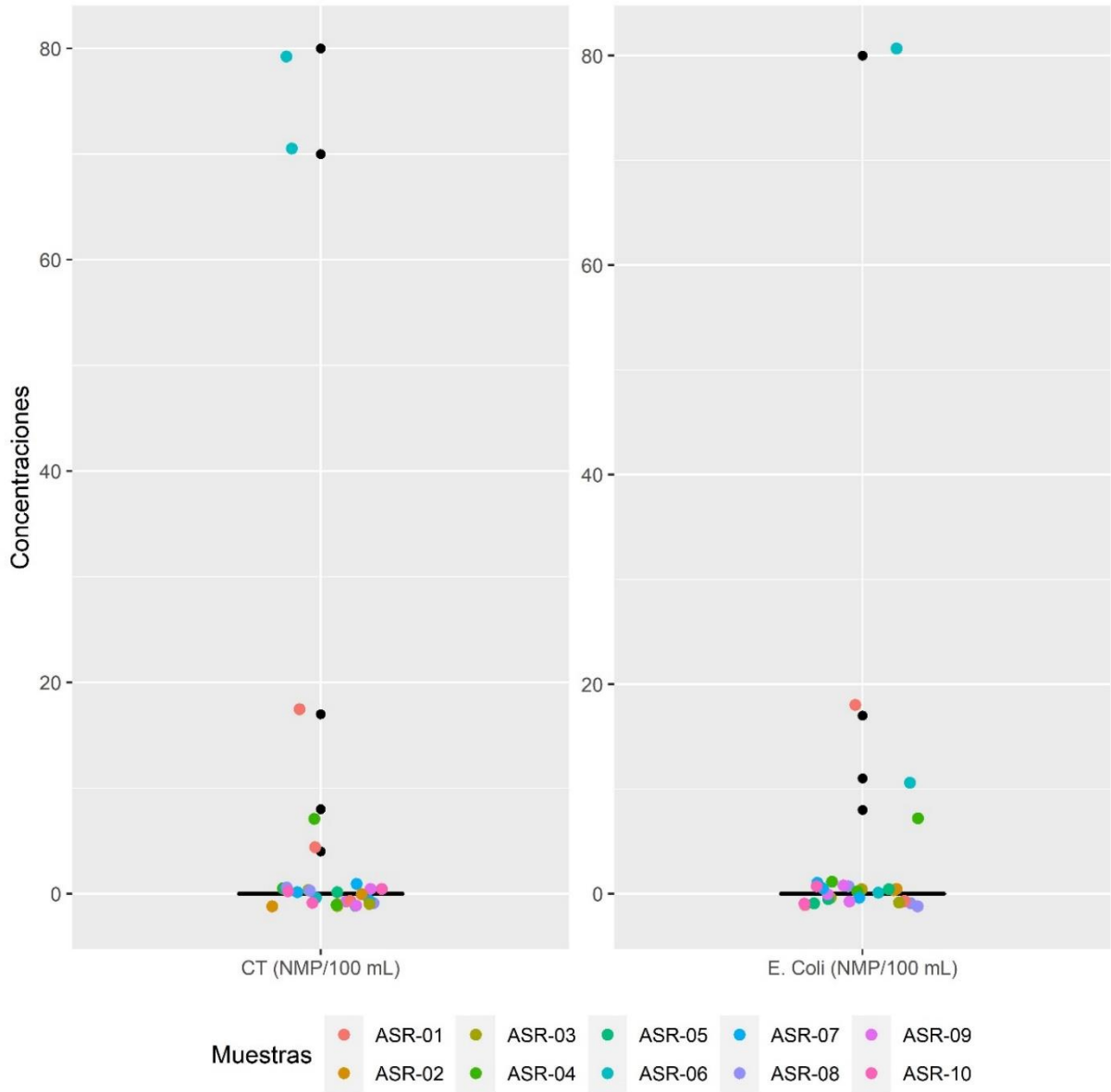
ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10
Naciente la Viuda	Tanque el Quijote	Red de distribución la Viuda	Naciente Cabuyal	Red de distribución Cabuyal	Naciente Bernardino	Tanque la Central	Red de distribución la Central	Tanque Ratoncilla	Red de distribución Ratoncilla



**Figura 14.** Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los cationes analizados.

Codificación:

ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10
Naciente la Viuda	Tanque el Quijote	Red de distribución la Viuda	Naciente Cabuyal	Red de distribución Cabuyal	Naciente Bernardino	Tanque la Central	Red de distribución la Central	Tanque Ratoncillal	Red de distribución Ratoncillal



**Figura 15.** Valores promedio de las tres campañas de muestreo para los parámetros microbiológicos analizados.

Codificación:

ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10
Naciente la Viuda	Tanque el Quijote	Red de distribución la Viuda	Naciente Cabuyal	Red de distribución Cabuyal	Naciente Bernardino	Tanque la Central	Red de distribución la Central	Tanque Ratoncilla	Red de distribución Ratoncilla

## Anexo 5. Informe de calidad de agua potable

### INFORME DE ANÁLISIS

**Dirigido a:** ASADA de Santa Rosa,  
Poás, Alajuela.

**Muestreado por:** Bach. Edwin Salas González,  
M.Sc. Rolando Sánchez Gutiérrez, M.Sc. Alicia  
Fonseca Sánchez.

**Lugar de muestreo:** Sistema de abastecimiento  
de la ASADA de Santa Rosa.

**Fechas de muestreos:** 2021-08-30,  
2021-07-29, 2021-11-01.

**Fecha del informe:** 2022-04-29

Cuadro 1. Resultados de los análisis por parámetro

Parámetro	Unidad	Valor promedio	VMA
Temperatura	°C	20.57	---
Conductividad	µS/cm	149.4	---
pH	-	6.79	6.0 – 8.0*
Turbidez	NTU	0.07	5.0
POR	mV	502.4	---
OD	mg/L	7.44	---
PSO	%	95.56	---
Cloro residual libre	mg/L Cl <sub>2</sub>	0.27	0.3 – 0.6 *
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	55.3	400
Alcalinidad	Mg/L CaCO <sub>3</sub>	48.6	---
SDT	mg/L	126.1	1000
Fluoruro	mg/L	0.061	0.7
Cloruro	mg/L	2.5447	250
Bromuro	mg/L	<0.077	---
Nitrito	mg/L	<0.074	0.1
Nitrato	mg/L	11.061	50
Sulfato	mg/L	5.778	250
Sodio	mg/L	3.977	200
Magnesio	mg/L	5.276	50
Potasio	mg/L	1.368	10
Calcio	mg/L	13.491	100
Litio	mg/L	<0.024	---
Amonio	mg/L	<0.031	0.5
Hierro	mg/L	< 0.13	0.3
Manganeso	mg/L	< 0.030	0.5
Cobre	mg/L	< 0.05	2.0
Zinc	mg/L	< 0.019	3.0
Coliformes totales	NMP/ 100 mL	0-80	No detectable
<i>Escherichia Coli</i>	NMP/ 100 mL	0-80	No detectable

Descripción: Resultados promedio por parámetro fisicoquímico y microbiológico obtenidos de 10 muestras de agua de consumo humano y tomadas en diferentes puntos del sistema de abastecimiento.

Cuadro 2. Resultados de los análisis por muestra

Parámetro	Unidad	ASR-01	ASR-02	ASR-03	ASR-04	ASR-05	ASR-06	ASR-07	ASR-08	ASR-09	ASR-10	VMA
Temperatura	°C	19.40	19.63	20.10	19.79	21.00	20.92	20.82	20.98	20.42	22.30	---
Conductividad	µS/cm	127.67	127.67	128.01	211.00	188.67	150.50	143.00	140.00	139.67	138.67	---
pH	-	6.66	6.70	6.93	6.61	6.70	6.83	6.91	6.86	6.84	6.87	6.0 – 8.0*
Turbidez	NTU	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.10	0.01	<0.02	0.46	0.06	5.0
POR	mV	234.62	538.45	533.52	351.32	520.23	415.95	577.90	608.23	626.45	617.22	---
OD	mg/L	4.92	5.91	6.48	7.80	7.32	8.35	8.25	8.33	8.93	8.11	---
PSO	%	64.95	73.20	83.42	99.42	92.65	109.88	106.02	107.82	113.38	104.87	---
Cloro residual libre	mg/L Cl <sub>2</sub>	<0.02	0.31	0.28	<0.02	0.42	<0.02	0.42	0.41	0.40	0.40	0.3 – 0.6 *
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	47.20	46.70	46.40	83.10	75.90	54.50	50.23	50.00	49.87	49.27	400
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	47.33	44.67	46.83	63.67	53.33	50.67	44.50	45.50	46.00	43.67	---
SDT	mg/L	114.33	111.67	114.33	166.67	158.67	136.00	124.67	120.00	119.00	95.67	1000
Fluoruro	mg/L	0.10	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.7
Cloruro	mg/L	1.74	1.80	1.79	4.57	3.90	2.53	2.31	2.30	2.27	2.25	250
Bromuro	mg/L	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	<0.077	---
Nitrito	mg/L	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	<0.074	0.1
Nitrato	mg/L	3.43	3.44	3.37	28.14	21.47	11.95	9.92	9.79	9.68	9.43	50
Sulfato	mg/L	5.23	5.23	5.19	7.65	6.95	5.73	5.49	5.46	5.44	5.41	250
Sodio	mg/L	3.18	3.17	3.21	4.88	4.60	4.19	4.13	4.12	4.14	4.16	200
Magnesio	mg/L	4.45	4.44	4.46	8.14	7.67	5.10	4.67	4.63	4.62	4.56	50
Potasio	mg/L	0.95	0.92	0.90	2.40	1.42	1.53	1.41	1.41	1.39	1.36	10
Calcio	mg/L	11.37	11.38	11.60	19.89	18.41	13.25	12.38	12.29	12.18	12.15	100
Litio	mg/L	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	---
Amonio	mg/L	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	<0.031	0.5
Hierro	mg/L	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13	0.3
Manganeso	mg/L	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	0.5
Cobre	mg/L	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	2.0
Zinc	mg/L	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	<0.019	3.0
Coliformes totales	NMP/ 100 mL	17	0	0	8	0	80	0	0	0	0	No detectable
<i>Escherichia coli</i>	NMP/ 100 mL	17	0	0	8	0	80	0	0	0	0	No detectable

Descripción: Resultados promedio por muestra de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos de 10 muestras de agua de consumo humano tomadas en diferentes puntos del sistema de abastecimiento.

### Observaciones

1. Metodología de análisis: Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. APHA-AWWA-WEF. 22ed. 2012.
2. Los valores con el signo “menor a” son resultados que se encuentran por debajo del límite de cuantificación de la técnica analítica empleada.

3. NMP: número más probable.
4. VMA: Concentración de sustancia o densidad de bacterias. a partir de la cual existe rechazo del agua por parte de los consumidores o surge un riesgo inaceptable para la salud. implica la toma de acciones correctivas inmediatas. Estos valores son definidos en el Anexo 1 del Decreto ejecutivo N° 38924-S “Reglamento para la Calidad del Agua Potable”
5. Los análisis de coliformes totales y *Escherichia Coli* fueron realizados por el Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ciencias Biológicas.
6. \*Para los parámetros de pH y cloro residual libre se establece rangos permisibles y no VA ni VMA.

**Anexo 6.** Balance iónico correspondiente a cada muestra en cada campaña de muestreo

<b>Campaña</b>	<b>Muestra</b>	<b><math>\Sigma</math>Aniones</b>	<b><math>\Sigma</math>Cationes</b>	<b>Balance iónico</b>
1	ASR-01	1.208	1.114	-4.047
	ASR-02	1.045	1.117	3.325
	ASR-03	1.194	1.117	-3.324
	ASR-04	1.942	1.891	-1.325
	ASR-05	1.641	1.673	0.963
	ASR-06	1.697	1.660	-1.121
	ASR-07	1.282	1.229	-2.120
	ASR-08	1.294	1.252	-1.656
	ASR-09	1.311	1.213	-3.886
	ASR-10	1.222	1.220	-0.105
2	ASR-01	1.089	1.046	-2.011
	ASR-02	1.122	1.023	-4.639
	ASR-03	1.070	1.048	-1.042
	ASR-04	2.128	1.888	-5.977
	ASR-05	1.836	1.760	-2.112
	ASR-06	1.325	1.080	-10.170
	ASR-07	1.164	1.129	-1.509
	ASR-08	1.238	1.137	-4.237
	ASR-09	1.237	1.120	-4.961
	ASR-10	1.200	1.124	-3.253
3	ASR-01	1.196	1.084	-4.894
	ASR-02	1.165	1.102	-2.754
	ASR-03	1.192	1.119	-3.161
	ASR-04	1.982	1.949	-0.838
	ASR-05	1.531	1.852	9.491
	ASR-06	1.174	1.117	-2.497
	ASR-07	1.250	1.251	0.032
	ASR-08	1.214	1.196	-0.763
	ASR-09	1.218	1.231	0.545
	ASR-10	1.189	1.204	0.610

**Anexo 7.** Puntaje, clasificación y calidad de agua promedio del IRCACH con los datos obtenidos de las tres campañas de muestreo realizadas.

<b>Muestra</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Calidad de agua</b>
ASR-01	23	Riesgo alto	No apta para la ingesta
ASR-02	4	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-03	4	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-04	14	Riesgo intermedio	No apta para la ingesta
ASR-05	2	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-06	23	Riesgo alto	No apta para la ingesta
ASR-07	2	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-08	2	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-09	2	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta
ASR-10	2	Riesgo muy bajo	Apta para la ingesta

**Anexo 8.** Propuesta de desinfección

**Cuadro 3.** Comparación del consumo sugerido contra el consumo añadido actualmente de pastillas semanales

<b>Pastillas semanales en la Naciente Cabuyal</b>						
<b>Caudal (L/s)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Cantidad sugerida</b>	2.7	5.4	8.1	10.8	13.5	16.3
<b>Cantidad añadida actualmente</b>	7					
<b>Pastillas semanales en la Naciente Bernardino Rodríguez</b>						
<b>Caudal (L/s)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Cantidad sugerida</b>	2.8	5.6	8.4	11.2	14	16.7
<b>Cantidad añadida actualmente</b>	9 a 10					

**Anexo 9.** Informe de propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa.

UNIVERSIDAD NACIONAL

Campus Omar Dengo

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUÍMICA

Informe de propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa, Poás,  
Alajuela.

Edwin Enrique Salas González

Tutor:

Máster Rolando Sánchez Gutiérrez

Asesoras:

M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

M.Sc. Carolina Alfaro Chinchilla

Heredia, Costa Rica

Junio, 2022

<b>TABLA DE CONTENIDOS</b>	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	87
ÍNDICE DE FIGURAS .....	87
1. Introducción.....	88
2. Objetivo y aplicación .....	88
2.1. Objetivo .....	88
2.2. Alcance .....	88
3. Definiciones.....	88
4. Demanda de cloro.....	89
5. Problemáticas encontradas y aspectos de mejora.....	90
5.1. Problemas de funcionamiento .....	90
5.2. Operación inexacta y generalista .....	90
5.3. Incorrecta dosificación y calibración del dosificador de pastillas.....	91
5.4. Falta de monitoreo de cloro residual .....	95
6. Recomendaciones .....	97

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	Página
Cuadro 1. Cantidad de pastillas por semana para el dosificador de la naciente Cabuyal. 94	
Cuadro 2. Cantidad de pastillas por semana para el dosificador de la naciente Bernardino Rodríguez. ....	94
Cuadro 3. Muestra del registro de cloración que puede implementar la ASADA de Santa Rosa.....	96
Cuadro 4. Hoja de registro de aforos en campo.....	96

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	Página
Figura 1. Hoja de cálculo para pastillas semanales. ....	93
Figura 2. Comparación del consumo teórico contra el consumo real de pastillas semanales .....	95

## **1. Introducción**

El presente documento corresponde a una guía producto de la investigación realizada en el trabajo final de graduación “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE LA ASADA DE SANTA ROSA, ALAJUELA, COSTA RICA” para optimizar y mejorar los procesos de desinfección de la ASADA de Santa Rosa. Se presentan ciertas pautas que ayudarán a mantener en buenas condiciones el sistema de desinfección y así asegurar que los usuarios consuman agua de buena calidad.

Su enfoque está dirigido a la dosificación del desinfectante, así como una comparativa con la dosificación utilizada actualmente, sin embargo, también se presentan recomendaciones en otros aspectos como la operación y el mantenimiento. Además, se busca facilitar principios técnicos de manera que se puedan aclarar las dudas que puedan surgir durante la práctica de cloración de agua y que se tomen las precauciones pertinentes en el manejo y uso de los productos clorados.

## **2. Objetivo y aplicación**

### **2.1. Objetivo**

Definir una propuesta de desinfección basada en criterios técnicos para la adecuada operación de los sistemas de desinfección de la ASADA

### **2.2. Alcance**

Esta guía está diseñada para ser utilizada por el personal operativo de la ASADA de Santa Rosa.

## **3. Definiciones**

**Agua potable:** Agua tratada que cumple con las disposiciones de valores máximos admisibles, estéticos, organolépticos, físicos, químicos, biológicos,

microbiológicos y radiológicos establecidos en el reglamento de la calidad de agua potable y que al ser consumida por la población no causa daño a la salud.

**ASADA:** Asociación administradora de acueductos y alcantarillados comunales.

**Desinfección:** Proceso de eliminación o inactivación de microorganismos patógenos presentes en el agua.

**Demanda de cloro:** Corresponde a una diferencia entre la dosis de cloro adicionada y el contenido de cloro residual consumido posterior al tiempo de contacto tras oxidar todo el material orgánico e inorgánico presente en el agua.

#### **4. Demanda de cloro**

Como primer aporte a este manual, se describe detalladamente la metodología para la determinación de la demanda de cloro en las aguas de nacientes.

En primer lugar, se inició con la selección de las nacientes de agua entre las tres que abastecen a la ASADA de Santa Rosa de Poás, se seleccionaron 2 de ellas (Cabuyal y Bernardino Rodríguez) para realizar el estudio de la demanda de cloro. Dicha selección se basó en las observaciones de la gira de reconocimiento realizada en agosto de 2021, donde se registró la división en dos subsistemas del sistema de abastecimiento, por lo que se seleccionó el subsistema que abastecía a una mayor cantidad de usuarios y se realizó el análisis en las nacientes que lo conformaban.

Para el análisis de demanda de cloro se realizaron 3 campañas de muestreo en los meses de agosto, setiembre y diciembre de 2021. La metodología empleada consistió en la medición en campo del cloro residual libre para 8 muestras de agua sin clorar en cada naciente a los que inicialmente se les agregó una masa sólida conocida de ácido tricloroisocianúrico (pastillas utilizadas como desinfectante) y posteriormente se les aplicó una dilución para que la concentración resultante pudiera ser analizada adecuadamente por el equipo empleado. Dicho procedimiento se basó en el método por diferencia 2350 B descrito por el "Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water", el método colorimétrico rápido de cloro residual libre en campo utilizando un Checker<sup>®</sup>HC y un esquema de dilución adaptado a la concentración de cloro disponible en las pastillas utilizadas por el

personal de la ASADA desarrollado por el equipo de investigación. Finalmente, en 2 de las campañas de muestreo de calidad de agua se midió la concentración de cloro en los tanques y líneas de distribución variando la frecuencia de dosificación de cloro para conocer si existe un decaimiento de cloro considerable en el sistema de abastecimiento.

Una vez que se contaba con los resultados de campo, estos se utilizaron para la construcción de curvas de demanda de cloro donde se relacionó gráficamente el cloro residual libre y la dosis de cloro aplicada, con la finalidad de definir la dosis mínima necesaria para asegurar la presencia de cloro residual libre en el sistema respetando los límites mínimos y máximos establecidos en la normativa nacional vigente. Además, se realizó una comparación gráfica entre las curvas de demanda obtenidas y un análisis del comportamiento del cloro residual en el sistema para cada una de las nacientes estudiadas.

## **5. Problemáticas encontradas y aspectos de mejora**

### **5.1. Problemas de funcionamiento**

Entre los problemas iniciales identificados en el sistema actual de desinfección de agua, se encontraron 3 parámetros con deficiencias en su funcionamiento:

- Operación inexacta y generalista
- Incorrecta dosificación y calibración del dosificador de pastillas
- Falta de monitoreo de cloro residual

### **5.2. Operación inexacta y generalista**

La operación de los dosificadores por erosión es sencilla, no obstante, el manejo de aspectos como el ajuste de la columna de inmersión de las tabletas o la velocidad del caudal que entra al dosificador se suelen manejar de una forma arbitraria, sin embargo, si esta columna se deja fija y se monitorea constantemente el flujo, el dosificador puede trabajar de forma independiente y sin necesidad de muchas modificaciones.

De acuerdo con lo anterior, un primer intento para disminuir la operación arbitraria del dosificador consta del monitoreo del caudal, donde se brindan dos

recomendaciones iniciales. En primer lugar, la instalación de salidas laterales de agua en la entrada de cada dosificador, de forma que se pueda realizar una medición de caudal de forma manual (con recipiente y un cronómetro) por lo menos una vez a la semana, de forma que se pueda ajustar semanalmente la dosis de cloro que se va a añadir.

Para realizar una medición de caudal manual, se debe de tomar un recipiente de capacidad conocida en un lugar donde se pueda recibir todo el caudal a medir de una manera estable y sin pérdidas de agua, una vez ubicado el recipiente, se debe medir con un cronómetro el tiempo que tarda en llenarse el recipiente y se debe de anotar el valor, dicha operación se debe repetir entre 5 a 7 veces, para posteriormente sacar el promedio de las mediciones y finalmente dividir el volumen del recipiente entre el promedio obtenido.

Como segunda recomendación, se observó durante los muestreos que los dosificadores contaban también con un rotámetro que indica el flujo de agua que entra constantemente, no obstante, estos dispositivos no estaban funcionando adecuadamente, por lo tanto, se recomienda su reparación y calibración de manera que se puedan usar para contrastar con los caudales manuales obtenidos, además de permitir tomar decisiones rápidas si durante la semana hay un cambio drástico en el caudal.

También es recomendable la constante revisión de las pastillas de cloro asegurándose que estas están en suficiente cantidad y en condiciones adecuadas para asegurar que la cloración permanezca constante y sin interrupciones.

### **5.3. Incorrecta dosificación y calibración del dosificador de pastillas**

La calibración del dosificador depende de tres factores:

- Caudal de agua
- Características físicas del desinfectante (sólido o líquido)
- Dosis de cloro necesaria

El primero de ellos corresponde al caudal, este determinante a la hora de dosificar cloro pues de él depende la cantidad de agua que entrará al dosificador para desinfectarse, además suele ser variable por lo que es difícil de definir, sin embargo, con las recomendaciones de la sección anterior se debería tener una aproximación lo suficientemente cercana. En el caso de las características físicas del desinfectante, este ya está definido y es adquirido mensualmente por la ASADA, corresponde a las pastillas ACL®90, adicionalmente, los dosificadores están diseñados para trabajar con este tipo de desinfectante, por lo tanto, un cambio no es necesario. No obstante, considerando las condiciones en las que se encontraron los sistemas de desinfección de la ASADA de Santa Rosa, estos dos parámetros ya están bien definidos por lo que el enfoque se puede dirigir al tercer parámetro.

De acuerdo con las demandas de cloro obtenidas en los muestreos y la concentración requerida por ley, es posible definir un consumo teórico sugerido de cloro por día, dando una idea más acertada de la situación y permitiendo evaluar si es suficiente o no.

### **5.3.1. Consumo de cloro teórico sugerido**

Determinando el caudal de forma manual o consultando el rotámetro del sistema, se tiene que:

$$Q = v/t \text{ (ecuación 1)}$$

Una vez que el caudal está definido, se puede calcular el volumen a desinfectar por día de la siguiente forma:

$$V = Q \left( \frac{L}{s} \right) * \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \text{ (ecuación 2)}$$

Ya con el volumen a desinfectar por día definido, se puede plantear la siguiente dosificación:

$$P = \frac{V * D_a}{10 * \%Cl} \text{ (ecuación 3)}$$

Donde:

P = Dosis de cloro añadida en gramos (considerando máxima disolución)

V = Volumen a desinfectar para un día (L)

D<sub>a</sub> = Concentración de cloro necesaria de acuerdo con la demanda (mg/L)

%Cl: Porcentaje de cloro en las pastillas

### 5.3.2. Cálculo de la dosis óptima en la práctica

Para efectos de este informe, se realizaron cálculos con caudales desde 1 L/s hasta 6 L/s, este suele ser el rango en donde varía el caudal de las nacientes de la ASADA, además, los cálculos están definidos para una concentración de cloro residual deseada de 0.6 mg/L (límite superior que define el reglamento de la calidad de agua potable). Sin embargo, como producto final se le entregará una hoja de cálculo a la ASADA con la información de la curva de demanda de cloro de forma que puedan modificar estos dos parámetros a conveniencia, esta hoja se puede apreciar en la figura 1.

Cálculo de la dosis de cloro en Naciente Bernardino Rodríguez	
1. Coloque el caudal de entrada al clorador en litros por segundo (L/s)	
2. Coloque la concentración de cloro residual libre que desea distribuir al sistema (mg/L)	
3. Anote la cantidad de pastillas por semana necesarias	
Caudal (L/s)	1
Concentración de cloro residual libre deseada (mg/L)	0,6
Cantidad de pastillas semanales	3

Cálculo de la dosis de cloro en Naciente Cabuyal	
1. Coloque el caudal de entrada al clorador en litros por segundo (L/s)	
2. Coloque la concentración de cloro residual libre que desea distribuir al sistema (mg/L)	
3. Anote la cantidad de pastillas por semana necesarias	
Caudal (L/s)	1
Concentración de cloro residual libre deseada (mg/L)	0,5
Cantidad de pastillas semanales	2

Figura 1. Hoja de cálculo para pastillas semanales

### 5.3.3. Resultados teóricos sugeridos

Cuadro 1. Cantidad de pastillas por semana para el dosificador de la naciente Cabuyal.

Naciente Cabuyal					
Caudal (L/s)	V (L/día)	C deseada	Da	P	Pastillas/semana
1	86400	0.60	0.78	77.38	2.7
2	172800	0.60	0.78	154.77	5.4
3	259200	0.60	0.78	232.15	8.1
4	345600	0.60	0.78	309.53	10.8
5	432000	0.60	0.78	386.92	13.5
6	518400	0.60	0.78	464.30	16.3

Cuadro 2. Cantidad de pastillas por semana para el dosificador de la naciente Bernardino Rodríguez.

Naciente Bernardino Rodríguez					
Caudal (L/s)	V (L/día)	C (mg/L)	Da (mg/L)	P	Pastillas/semana
1	86400	0.60	0.81	79.76	2.8
2	172800	0.60	0.81	159.52	5.6
3	259200	0.60	0.81	239.28	8.4
4	345600	0.60	0.81	319.05	11.2
5	432000	0.60	0.81	398.81	14.0
6	518400	0.60	0.81	478.57	16.7

Estos resultados teóricos mostrados en el cuadro 1 y 2 se compararon con la cantidad de pastillas semanales utilizadas actualmente por el fontanero en los dos sistemas, como se describe en la figura 2.

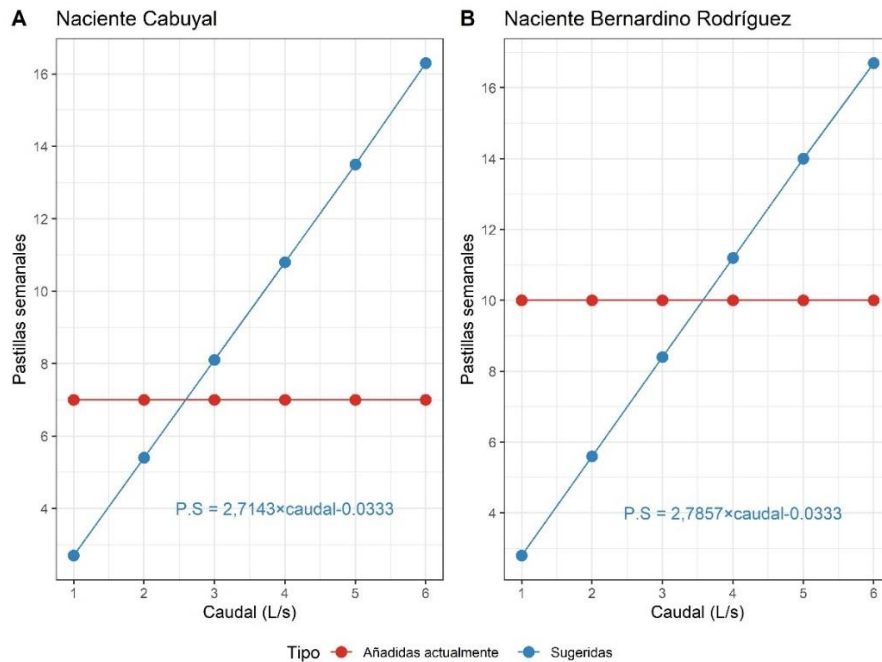


Figura 2. Comparación del consumo teórico contra el consumo real de pastillas semanales

De lo anterior se concluye que la cantidad de pastillas es dependiente del caudal de agua que se tenga al momento de la cloración y en los días posteriores, por esta razón una dosis fija e invariable no es lo más adecuado, pues si el caudal es bajo se puede dar lugar a una sobrecloración y por el contrario si el caudal es muy alto, la cantidad de cloro será insuficiente. Por esta razón se recomienda utilizar el documento “Hoja de cálculo de pastillas semanales” para calcular semanalmente la dosis adecuada de pastillas dentro del clorador.

#### 5.4. Falta de monitoreo de cloro residual

Para un adecuado monitoreo de cloro residual, la ASADA puede tomar medidas de forma que el chequeo sea constante. En primer lugar, la adquisición de un checker de cloro residual libre, kits de comparación o papeles indicadores, y en caso de ya contar con alguno de estos dispositivos iniciar con la utilización del mismo, podría mostrar un escenario más realista, complementando así las recomendaciones de dosificación, adicionalmente, es necesario acoplar los registros existentes de la cantidad de pastillas utilizadas en las recargas con estas

posibles mediciones de cloro, de forma que se genere un registro unificado sobre esta información.

Un ejemplo de registro puede ser el siguiente:

Cuadro 3. Muestra del registro de cloración que puede implementar la ASADA de Santa Rosa.

Registro de cloración de agua de consumo humano						
Dosificador por erosión de pastillas						
ASADA _____			Responsable _____			
Naciente _____			Firma _____			
Fecha	Q (L/s)	Recarga (Cantidad de pastillas)	Lecturas de cloro residual		Observaciones	Firma
			Tanque principal	Distribución (última casa)		

Adicionalmente, en caso de determinar el caudal de forma manual, se propone el siguiente ejemplo para el registro de los aforos correspondientes:

Cuadro 4. Hoja de registro de aforos en campo

Registro de aforos, ASADA de Santa Rosa	
Fuente	
Fecha	
Volumen usado (L)	


Medición	Tiempo (s)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
Promedio (s)	
Caudal (L/s)	

## 6. Recomendaciones

Como recomendaciones finales, se pueden tomar una serie de cuidados y precauciones mínimas para la manipulación de las pastillas y operación del dosificador.

- Retirar y limpiar las uniones y conexiones de entrada/salida al dosificador para evitar obstrucciones
- Conectar nuevamente todas las uniones, conexiones al sistema de desinfección para retomar su estado normal de operación.
- Revisar y limpiar adecuadamente los tanques de almacenamiento por lo menos una vez al mes o cuando se observe presencia de sólidos en el fondo, trasladándolo a un lugar adecuado para su limpieza
- Eliminar los residuos incrustados en dosificador adecuadamente
- Utilizar guantes, mascarilla y lentes de seguridad para la manipulación del desinfectante
- Almacenar adecuadamente las pastillas en un lugar fresco, ventilado y sin humedad, lejos de la luz del sol o altas temperaturas
- Utilizar recipientes cerrados y resistentes a la corrosión

## Anexo 10. Presentación para el taller de desinfección de agua.



### INFORME DE PROPUESTA DE DESINFECCIÓN PARA LA ASADA DE SANTA ROSA

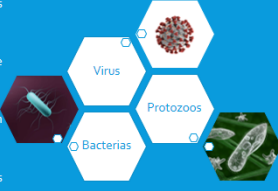
Bach. Edwin Enrique Salas González  
Tutor: Máster Rolando Sánchez Gutiérrez  
Asesora: M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

### CONTENIDOS

- Introducción
  - Qué es la cloración?
  - Principios de la cloración
  - Principios de la cloración de agua potable
- Presentación de resultados y propuestas
  - Calidad de agua
  - Capacidad de cloro
  - MCALD
  - Posibilidad de desinfección
- Otras recomendaciones
  - Monitoreo
  - Almacenamiento

### ¿QUÉ ES LA CLORACIÓN?

- La presencia en el agua de microorganismos como:
- Puede representar un riesgo para la salud de las personas causando diversas enfermedades
- Por esta razón, la desinfección de agua es un proceso necesario para proteger a las personas
- La cloración es la técnica de desinfección más usada a nivel mundial



### ¿QUÉ ES LA CLORACIÓN?

Este proceso consiste en:



**Bacterias** (Más efectivo) → **Virus** → **Protozoos** (Menos efectivo)

### PROPIEDADES DEL CLORO

- Bajo costo
- Alta reactividad y eficacia
- Efecto residual
- Es corrosivo y genera fuertes olores
- Escapa rápidamente del agua al aire

### TRES FORMAS DE USO

- Sólido
- Líquido
- Gas

### PROPIEDADES DEL CLORO SÓLIDO

- No se encuentra puro (es mezclado con otras sustancias)
- Su poder desinfectante depende de su "concentración" (%Cl<sub>2</sub>)
- Se encuentra en polvo, granos o tabletas
- Forma más estable
- Se encuentra desde 30% hasta 90% de cloro activo

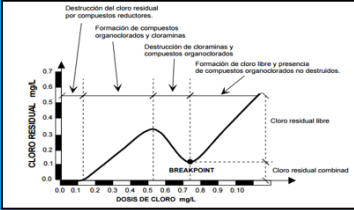
### PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: DOSIS DE CLORO

- Consiste en cuánto cloro es añadido al agua

Unidades más comunes: mg/L

- La dosis de cloro para un sistema de agua se debe de determinar específicamente caso por caso

## PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: DEMANDA DE CLORO



Aguas contaminadas  
Alta concentración de material orgánico e inorgánico

Aguas Limpias  
Baja concentración de material orgánico e inorgánico

9

\*

## PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: DECAIMIENTO DE CLORO

Para disminuir este efecto la concentración al inicio del sistema suele ser mayor

Disminución de concentración de cloro en el agua potable

Ocurre desde el punto de desinfección hasta el sistema de distribución

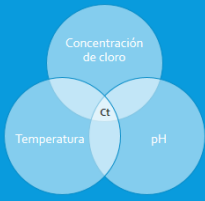
Ocurre producto de la descomposición del cloro en el sistema

Se consideran aspectos como:  
- La demanda de cloro  
- Tamaño del sistema de distribución

10

\*

## PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: VALOR Ct



La OMS recomienda un tiempo de contacto de 30 min cuando  $\geq 0,5$  mg/L, y el  $\text{pH} < 8$

11

\*

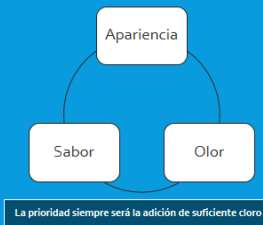
## PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: TIEMPO DE CONTACTO

+	0,4 mg/L	3 mg/L
	5°C	20°C
	8,5	6,5
	1000 NTU	1 NTU

12

\*

## PRINCIPIOS DE CLORACIÓN: OTROS ASPECTOS IMPORTANTES



13

\*



## PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTAS

14

\*

Parámetro	Unidad	Valor	Normativa
Temperatura	°C	10-20	...
Acidez	mg/L	10-20	...
pH		6,5-8,5	RD 140/2003
Color	PCU	10-20	RD 140/2003
ODM	mg/L	0,5-1,0	RD 140/2003
NO <sub>3</sub>	mg/L	50	RD 140/2003
NO <sub>2</sub>	mg/L	0,1	RD 140/2003
Cloro residual	mg/L	0,2-0,5	RD 140/2003
Dureza	mg/L	100-200	RD 140/2003
Alcalinidad	mg/L	100-200	RD 140/2003
Fe	mg/L	0,3	RD 140/2003
Mn	mg/L	0,1	RD 140/2003
As	mg/L	0,05	RD 140/2003
Cd	mg/L	0,01	RD 140/2003
Cu	mg/L	0,05	RD 140/2003
Pb	mg/L	0,05	RD 140/2003
Zn	mg/L	1,0	RD 140/2003
Ag	mg/L	0,01	RD 140/2003
Co	mg/L	0,01	RD 140/2003
Ni	mg/L	0,05	RD 140/2003
Mg	mg/L	100	RD 140/2003
Ca	mg/L	100	RD 140/2003
Cl	mg/L	100	RD 140/2003
SO <sub>4</sub>	mg/L	100	RD 140/2003
NO <sub>3</sub>	mg/L	50	RD 140/2003
NO <sub>2</sub>	mg/L	0,1	RD 140/2003
Cloro residual	mg/L	0,2-0,5	RD 140/2003
Alcalinidad	mg/L	100-200	RD 140/2003
Dureza	mg/L	100-200	RD 140/2003

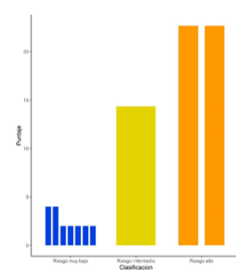
## RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA

La mayoría de parámetros analizados se encuentran dentro de los límites aceptables en el RCAP.

El cloro residual y los parámetros microbiológicos incumplieron en algunas de muestreo la normativa nacional.

15

\*



## RESULTADOS DEL IRCACH

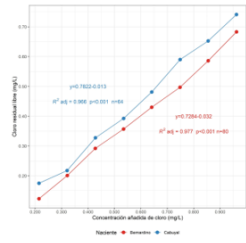
Se obtuvieron dos puntos con riesgo alto, un punto con riesgo intermedio y siete puntos con riesgo muy bajo.

Los puntos con mayor riesgo corresponden a las tres recientes estaciones.

16

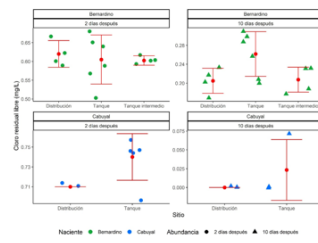
\*

### CURVAS DE DEMANDA DE CLORO



17

### COMPORTAMIENTO DEL CLORO RESIDUAL EN LOS LO LARGO LOS PUNTOS



18

### PROPUESTA DE DESINFECCIÓN

Cálculo del volumen a desinfectar por día:

$$Q = vt$$

$$V = Q \left( \frac{1}{100} \right) + \frac{26400 \cdot x}{1 \text{ día}}$$

19

### PROPUESTA DE DESINFECCIÓN

Cálculo de la concentración de cloro necesaria (mg/L)

Naciente Cabuyal:

$$y = 0.7822x - 0.013$$

$$0.6 = 0.7822x - 0.013$$

$$x = 0.7837 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Naciente Bernardino Rodríguez:

$$y = 0.7824x - 0.032$$

$$0.6 = 0.7824x - 0.032$$

$$x = 0.8077 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

20

### PROPUESTA DE DESINFECCIÓN

Cálculo de la dosis óptima (g)

$$P = \frac{V \cdot C_n}{100 \cdot \%Cl} \text{ (ecuación 2)}$$

Donde:

- P = Dosis de cloro añadida en gramos (considerando máxima disolución)
- V = Volumen a desinfectar para un día (L)
- Cn = Concentración de cloro necesaria de acuerdo con la demanda (mg/L)
- %Cl: Porcentaje de cloro en las pastillas

21

### RESULTADOS TEÓRICOS SUGERIDOS

**Cálculo de la dosis de cloro en Naciente Cabuyal**

- Coloque el caudal de entrada al clorador en litros por segundo (L/s)
- Coloque la concentración de cloro residual libre que desea distribuir al sistema (mg/L)
- Añade la cantidad de pastillas por semana necesarias

Caudal (L/s)	1
Concentración de cloro residual libre deseada (mg/L)	0.5
Cantidad de pastillas semanales	2

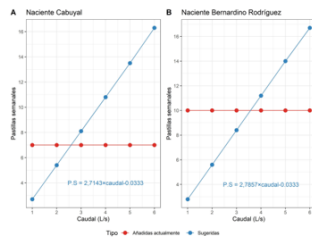
**Cálculo de la dosis de cloro en Naciente Bernardino Rodríguez**

- Coloque el caudal de entrada al clorador en litros por segundo (L/s)
- Coloque la concentración de cloro residual libre que desea distribuir al sistema (mg/L)
- Añade la cantidad de pastillas por semana necesarias

Caudal (L/s)	1
Concentración de cloro residual libre deseada (mg/L)	0.5
Cantidad de pastillas semanales	3

22

### COMPARACIÓN CON DATOS REALES



23



### RECOMENDACIONES

24

Registro de ahoros, ASADA de Santa Rosa	
Fuente	
Fecha	
Volumen usado (L)	
Medición	Tiempo (s)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
Promedio (s)	
Caudal (L/s)	

## MONITOREO DEL CAUDAL

- Reparación de rotámetros o instalación de salidas laterales antes del clorador

25

\*

## MONITOREO DE CLORO RESIDUAL

26

\*

## MONITOREO DE CLORO RESIDUAL

Papeles indicadores

Kit de test de comparación

Medidor de cloro

← Precisión y costo →

27

\*

## CONSIDERACIONES AL MONITOREAR

Volátil  
Escapa a fase gaseosa

Análisis in situ  
Realizar la lectura de cloro de inmediato

Toma de muestra  
No agitar la muestra

28

\*

## MUESTRA DEL REGISTRO DE CLORACIÓN QUE PUEDE IMPLEMENTAR LA ASADA DE SANTA ROSA.

Registro de cloración de agua de consumo humano						
Dosisador por erosión de pastillas						
ASADA _____			Naciente _____			
Fecha	Q (L/s)	Recarga (Cantidad de pastillas)	Lecturas de cloro residual		Observaciones	Firma
			Tanque principal	Distribución (última casa)		

29

\*

## EQUIPO DE PROTECCIÓN MÍNIMO

Guantes

Mascarilla

Lentes de seguridad

30

\*

## ALMACENAMIENTO

- Es un punto importante a considerar
- Un mal almacenamiento acelera el proceso de degradación, por eso es recomendable:

Lugar fresco y ventilado, sin humedad

Lejos del sol y altas temperaturas

Almacenar en recipientes resistentes a corrosión

Mantener los recipientes cerrados si no se usan

"Primerizo en entrada, primario en salida"

31

\*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WHO. Principios and Práctica de Drinking-Water Chlorination, 2013.
- [2] Castro-Romero, G., Espinoza M., S. EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA ASADA DE COC. COC. OREANINO, DESDE UNA PERSPECTIVA DEL USO SOSTENIBLE DEL RECURSO HÍDRICO. Lima, 2016.
- [3] Mirra, S. Evaluación de Las Principales Tecnologías Utilizadas En Costa Rica Para La Desinfección de Agua, 2011.
- [4] Salazar, F., Méndez, J. Desinfección de Agua. Cens. Perteneciente Reg. Sani. y Control del Ambiente. 2005, 45-58.
- [5] Nephew, J., Winkler, F., Ryan, J., Miller, S. Construction and Testing of a Drinking Water Disinfection and Filtration System for Developing Nations. Int. J. San. Leav. Eng. Humani. Reg. Sci. 2008, 7(1), 33-53. <https://doi.org/10.24000/ijsh.v4i1.13458>.
- [6] OPS. Guía Para La Operación y Mantenimiento De Sistemas De Desinfección, 2005.
- [7] OPS. Guía Para La Selección de Sistema de Desinfección, 2007.
- [8] Villalón, M. Evaluación y Propuesta de Mejora Del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable de La ASADA Pasara de Puntarenas. Angra. Chemi. Int. 7(2) 2012, 2012, 2012, 20-24.
- [9] González, A. Desinfección Del Agua, Mediante El Uso Del Acido Tetrabromoclorato, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [10] Chacón, C. A. F., Ordoñez, C. L. S. "Modelo Y Implementación De Un Sistema Automatizado Para La Desinfección De Cloro En El Tratamiento De Agua Potable En La Comandancia San Rafael De Lajas", 2012.

32

\*

**Anexo 11.** Programa del taller y fotografías de la actividad

### **Programa del taller:**

## **“Fortalecimiento de las capacidades en planes de seguridad del agua y sistemas de desinfección para la ASADA de Santa Rosa”**

### **Objetivos**

- Enseñar a la población sobre las generalidades del proceso de cloración, las propiedades del cloro como desinfectante, y los principios que rigen las buenas prácticas de cloración.
- Presentar los principales resultados obtenidos de los análisis de calidad de agua y demanda de cloro, así como la propuesta de desinfección que se puede implementar en los sistemas de desinfección de la ASADA de Santa Rosa.

### **Lugar**

- Sala de reuniones de la ASADA de Santa Rosa de Poás.

### **Personal asistente**

- Edwin Salas González
- Nicole Vargas Alvarado
- Alicia Fonseca Sánchez

## I. Cronograma

**Actividad planeada para el día 8 de setiembre a las 7:00 p.m**

<b>Hora</b>	<b>Actividad</b>
4:00 p.m.	Salida de la sede Omar Dengo, UNA
6:00 p.m.	Llegada a la ASADA de Santa Rosa
6:30 p.m.	Inicio de los preparativos para el taller
7:00 p.m.	Inicio del taller
9:00 p.m.	Finalización del taller
9:10 p.m.	Regreso a la sede Omar Dengo, UNA

## II. Materiales y equipo

- Computadora portátil
- Proyector
- Extensión eléctrica
- Cámara fotográfica
- Listas de asistencia

### III. Programa del taller

Actividad	Descripción	Materiales	Instructor	Tiempo (min)
1. Bienvenida	Se recibió a todos los asistentes del taller y se les presenta el cronograma, indicando duración y los objetivos que esta actividad tiene	N.A	Edwin Salas González y Nicole Vargas Alvarado	5
2. Actividad “rompe hielos”	Se les solicitó a los presentes que ingresen a la dirección web <a href="https://kahoot.it">https://kahoot.it</a> , para que ingresen a una trivía rápida de 9 preguntas aproximadamente previamente preparada, donde se preguntarán por conceptos básicos del cloro, la desinfección, entre otros, actuando como un diagnóstico sobre los conocimientos del público y que la charla sea más dinámica.  Las 3 personas ganadoras recibieron un premio simbólico por su esfuerzo	-Computadora -Proyector -Extensión -Celulares	Edwin Salas González y Nicole Vargas Alvarado	10
3. Espacio Nicole	Mediante una presentación de PowerPoint, se presentó a los asistentes aspectos	-Computadora -Proyector	Nicole Vargas	30

	básicos sobre Planes de Seguridad del Agua, su objetivo, importancia, elementos, pasos y ejemplos, entre otros. La presentación contó con 30 diapositivas	-Puntero laser -Archivo pptx		
4. Preguntas de Nicole	-Se brindó un espacio de máximo 10 minutos para preguntas referentes a la presentación	-Computadora -Proyector -Puntero laser -Archivo pptx	Nicole Vargas Alvarado	10
5. Pregunta conectora	Se realizó una pregunta conectora entre el tema de PSA y la desinfección de agua	-	Nicole Vargas Alvarado	
6. Presentación de generalidades y propuesta de desinfección	Mediante una presentación de PowerPoint, se presentará a los asistentes los conceptos generales del cloro y el proceso de desinfección, posterior a esta etapa, se mostrarán los resultados de calidad de agua, la curva de demanda de cloro y la propuesta de desinfección para la ASADA de Santa Rosa. La presentación contó con 13 diapositivas introductorias sobre las generalidades de la cloración, 5 diapositivas sobre los resultados	-Computadora -Proyector -Puntero laser -Archivo pptx	Edwin Salas González	30

	obtenidos, 5 diapositivas sobre la propuesta de desinfección y finalmente 10 diapositivas sobre recomendaciones para optimizar la desinfección dentro de la ASADA, para un total de 33 diapositivas.			
7. Espacio para preguntas	Se brindó un espacio de máximo 10 minutos para preguntas referentes a la presentación	-	Edwin Salas González	10
8. Cierre	Se despidió al público presente agradeciendo por su participación y pasando una hoja de asistencia para tener evidencia.	-Hoja de asistencia	Edwin Salas González	-

Fotografías de la actividad:



**Figura 16.** Introducción del taller por la M.Sc. Alicia Fonseca



**Figura 17.** Presentación de la expositora Nicole Vargas



**Figura 18.** Presentación del expositor Edwin Salas



**Figura 19.** Público presente en el taller

Anexo 12. Lista de asistencia al taller.



Lista de asistencia al taller

“Fortalecimiento de las capacidades en planes de seguridad del agua y sistemas de desinfección para la ASADA de Santa Rosa”

Impartido el 8 de setiembre de 2022 a las 7:00 pm

Proyecto institucional FIDA-SIA 0615-19 “Contribución a la gestión integrada del recurso hídrico en la subcuenca Poás mediante la generación de insumos que propicien procesos efectivos en el manejo del agua”

Nombre	Teléfono	Correo electrónico	Cargo dentro de la ASADA de Santa Rosa	Firma
Sonia Quirós Poveda	6040-1610	squirins2448@gmail.com	asistente adm	
Alfonso Coto Alvarado	8955-1526	albertoc11626@gmail.com	Interventor.	
Ania Rojas Castro	8837-7278	rojasania639@gmail.com	Vocal	
Edy Salazar Quesada	83222672	edy21061969@hotmail.com	con Tesorero	
Luis Alberto Quesada Alvarado	8982-2555	lquesada1206@hotmail.com	Vocal 2	