

**FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE
DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
OCCIDENTE**



**KATHERINE MAFLA ZARZA
2146455**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2021**

**FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE
DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
OCCIDENTE**



KATHERINE MAFLA ZARZA

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

**Director
JAVIER JURADO ROSERO
Químico Industrial
Magister en Ingeniería y Tecnología Ambiental**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
2021**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Ambiental

NANCY VÁSQUEZ SARRIA
Jurado

Santiago de Cali, 30 de septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo no lo puedo catalogar como algo fácil, debo aceptar que fue un proceso largo y muchas veces incierto, pero lo que sí puedo asegurar es que durante este proceso pude aprender mucho en cada momento. Es por esto que quiero aprovechar este espacio para agradecer inicialmente a mi amigo y director de tesis Javier Jurado, a quien agradezco no solo su acompañamiento sino también su paciencia y apoyo incondicional.

Debo agradecer de manera especial a mi familia por alentarme y motivarme en cada paso del camino, a pesar de las burlas podemos decir que lo logré y que todo el esfuerzo de mis padres ha rendido sus frutos.

Finalmente quiero agradecer a Dios, por iluminarme y poner en mi camino personas maravillosas que creen en mí.

CONTENIDO

	p.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
4. ANTECEDENTES	18
4.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	18
4.2 ANTECEDENTES EN EL CONTEXTO NACIONAL	20
5. MARCO TEÓRICO	22
5.1 POTABILIZACIÓN DEL AGUA	22
5.1.1 Pretratamiento	22
5.1.2 Coagulación	22
5.1.3 Floculación	23
5.1.4 Decantación	23
5.1.5 Filtración	23
5.2 AGUA POTABLE	23

5.2.1 Características físicas	23
5.2.2 Características químicas	24
5.2.3 Características microbiológicas	24
5.3 DESINFECCIÓN	24
5.3.1 Concentración del agente	24
5.3.2 Tiempo de contacto	25
5.3.3 pH	25
5.3.4 Temperatura	25
5.4 DESINFECCIÓN CON CLORO	25
6. METODOLOGÍA	27
6.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	27
6.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS OPERACIONALES DE LA ETAPA DE DESINFECCIÓN DENTRO DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN	28
6.3 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN	32
6.3.1 Análisis de la calidad inicial de la fuente de abastecimiento	32
6.3.2 Análisis de la calidad del agua para consumo humano en términos del proceso de desinfección	32
6.3.3 Ensayos de demanda de cloro	33
6.4 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UAO	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
7.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS Y LA FRECUENCIA DE MUESTREO	35
7.2 ANÁLISIS LA VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, TENIENDO EN CUENTA LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007	36

7.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS OPERACIONALES DE LA ETAPA DE DESINFECCIÓN DENTRO DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN	39
7.3.1 Reconocimiento del sistema de potabilización de agua en la universidad autónoma de occidente	39
7.3.2 Diagnostico operacional en las etapas de operación de la PTAP	43
7.4 ANÁLISIS DE LA CALIDAD INICIAL DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO	47
7.5 DEMANDA DE CLORO	50
7.6 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE	56
8. CONCLUSIONES	59
9. RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS	61
ANEXOS	67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2 <i>Ubicación de la Universidad Autónoma de Occidente</i>	27
Figura 3. <i>Puntos de muestreo en la red de distribución de agua potable en la UAO</i>	35
Figura 4. <i>DR 900 de HACH</i>	37
Figura 5. <i>Monitoreo del Cloro Residual Libre</i>	38
Figura 6. <i>Esquema del sistema de potabilización de agua en la Universidad Autónoma de Occidente</i>	40
Figura 7. <i>Vista externa del sistema de filtración de la PTAP de la UAO.</i>	41
Figura 8. <i>Tanque de almacenamiento de agua filtrada de la PTAP de la UAO</i>	41
Figura 9. <i>Sistema de bombeo de la PTAP de la UAO</i>	42
Figura 10. <i>Tanque de mezcla de la solución clorada para la desinfección del agua de la PTAP de la UAO</i>	43
Figura 11. <i>Manguera de salida del tanque de mezcla de la solución clorada</i>	45
Figura 12. <i>Resultados pruebas de coliformes</i>	49
Figura 13. <i>Toma de muestras de agua sin tratar a la entrada de la PTAP en la UAO</i>	51
Figura 14. <i>Seguimiento de la demanda de cloro</i>	53
Figura 15. <i>Evaluación de la demanda de cloro con respecto al tiempo</i>	54

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Actividades para la identificación de los aspectos operacionales de la etapa de desinfección	29
Tabla 2. Ítems a analizar según la información manejada por la UAO como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento de la planta de potabilización	31
Tabla 3. Parámetros para evaluación de la calidad del agua cruda de la fuente de abastecimiento	32
Tabla 4. Parámetros para evaluación de la calidad del agua para consumo humano	33
Tabla 5. Aspectos a considerar para la formulación y diseño de alternativas de mejora para el proceso de desinfección	34
Tabla 6. Ubicación de los puntos de muestreo de la calidad del proceso de desinfección	36
Tabla 7. Diagnóstico operacional de las etapas de la PTAP de la UAO	43
Tabla 8. Información obtenida por parte de la institución como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento	46
Tabla 9. Evaluación de la calidad del agua cruda de la fuente de abastecimiento	48
Tabla 10. Evaluación de los parámetros de alcalinidad y dureza en agua tratada	50
Tabla 11. Demanda de Cloro inicial	52
Tabla 12. Dosis de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ elegidas	53
Tabla 13. Formulación de alternativas de mejora para el proceso de desinfección en la PTAP de la Universidad Autónoma de Occidente	57

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Curva de demanda de cloro	67
Anexo B Dosificador de cloro con bomba eléctrica	68

RESUMEN

Con el fin de evaluar la necesidad de formular alternativas de mejora en el proceso de desinfección de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la Universidad Autónoma de Occidente, se analizaron los niveles de cloro residual libre en la red de distribución de la institución con respecto a los lineamientos de calidad establecidos por la Resolución 2115 de 2007 para agua potable. Como resultado del diagnóstico hecho, se encontró que en la red de distribución se presenta un elevado consumo de agua, que ocasiona que en diferentes momentos se alcancen concentraciones de cloro residual menores al límite mínimo permisible; este hallazgo permitió proponer alternativa de mejoramiento para el proceso de desinfección de tal manera que se garantice la salubridad permanente del agua, permitiendo proteger a la población en cuestión de riesgos microbiológicos por su consumo.

Palabras clave:

Desinfección, cloro residual libre, Resolución 2115 de 2007, agua potable, Universidad Autónoma de Occidente.

ABSTRACT

With the purpose of evaluating the need to formulate alternatives to improve the disinfection process of the drinking water treatment plant of the Universidad Autónoma de Occidente, the levels of free residual chlorine in the institution's distribution network were analyzed regarding the quality guidelines established in the Resolution 2115 of 2007 for drinking water. As a result of the diagnosis made, it was found that there is an elevated consumption of the water in the distribution network, which causes to lower the residual chlorine concentrations at different times of the day underneath the minimum permissible limit; this finding made it possible to propose an improvement alternative for the disinfection process in order to guarantee the permanent salubrity of the water, allowing the consuming population to be protected from the microbiological risk due to water consumption.

Keywords: Disinfection, free residual chlorine, Resolution 2115 of 2007, drinking water, Universidad Autónoma de Occidente.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Autónoma de Occidente fundada en 1970, terminó la construcción de su segunda sede en el sector de Valle del Lili en el año 1999; aunque actualmente se encuentra en la zona de expansión, para la última fecha mencionada estaba ubicada en la zona rural de la ciudad de Cali, como no podía conectarse a la red de distribución municipal del servicio de agua potable se optó por la extracción de aguas subterráneas como la opción más viable para su abastecimiento, con el fin de tratarlas en una Planta de potabilización de agua potable (PTAP) al interior de la universidad; en la actualidad la estructura sigue supliendo en su totalidad la demanda del preciado recurso en la institución. La PTAP consta de una unidad de filtración directa compuesta por una capa de arena de cantera lavada y carbón activado como medio filtrante, una capa de gravas de cuarzo como medio de soporte y un falso fondo de plaquetas de concreto con orificios. Una vez es evacuada el agua filtrada, se almacena en un tanque y posteriormente es bombeada a presión constante (Leyton Flor y Contreras Rengifo, 2015, p. 21); mientras el agua filtrada permanece en el tanque de almacenamiento, se le añade una sustancia clorada la cual es la encargada de la desinfección, de esta forma se culmina el proceso de potabilización.

La potabilización es definida por la Real Academia Española (RAE) como: “la acción de convertir el agua en potable, y por tanto, hacerla susceptible de abastecer a una población” ; para consumo humano, el agua potable, debe cumplir con determinadas características fisicoquímicas que no atenten contra la salud, por ello, se deben realizar algunos análisis básicos que determinen sus características como: la turbiedad, el color aparente, el pH, la concentración de cloro residual libre o residual de desinfectante usado, los coliformes totales y la *Escherichia coli* (Resolución 2115 de 2007, p. 1).

Según cálculos de la OMS, 2016 citado por Arpi Barrera y Yunga Guamán en su tesis de pregrado “Evaluación de la calidad de agua de los sectores Corazón de María y Zhirincay (2017) de la Junta Administradora de agua potable Regional Bayas del Cantón Azogues”, alrededor de 842.000 personas mueren al año por la deficiente calidad del agua o por mala higiene de las manos, razón que resalta la importancia de garantizar una adecuada potabilización del agua en la que se remuevan todas las impurezas que contiene el agua cruda y se eliminen los riesgos microbiológicos por la ingesta de agua tratada insuficientemente (p. 5). Por otro lado, a nivel municipal, en Cali se encontró que de 274 personas que notificaron casos con síntomas de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA), el 16,1% de los brotes se presentaron por consumo de alimentos/agua en establecimientos educativos, para el 12,9% de los casos anteriores se realizó muestreo y se obtuvo

que en su mayoría había presencia de coliformes fecales (Secretaría de Salud Pública Municipal de Santiago de Cali ,2017, pp. 166-167).

Con el análisis de los niveles de cloro residual libre en la red de distribución de la UAO se obtuvo la información necesaria para diagnosticar las concentraciones del agente desinfectante y comparar con la Resolución 2115 de 2007 que establece los lineamientos sobre la calidad del agua para consumo, con el fin de evaluar la necesidad de implementar alternativas de mejora en el proceso. Los resultados de este diagnóstico mostraron que en la red de distribución se presenta un consumo de cloro, que ocasiona que en diferentes momentos se alcancen niveles de cloro residual menores al mínimo establecido; este hallazgo permitió proponer una alternativa de mejoramiento para el proceso de desinfección de tal manera que se garantice la salubridad permanente del agua, permitiendo proteger a la población en cuestión de riesgos microbiológicos por su consumo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acceso al agua potable es indispensable para la salud humana, por este motivo se encuentra entre uno de los derechos humanos básicos (Resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas, 2010). Es de conocimiento general que el consumo de agua potable de calidad es fundamental para la buena salud en los seres humanos, ya que al garantizar este suministro se evitan riesgos que puedan afectar nuestro metabolismo.

La UAO en su sede Valle del Lili, en su principio institucional de sostenimiento ambiental y garante de la prevención de riesgos contra la salud e integridad de sus usuarios y en su preocupación de velar por lo anterior, construyó e implementó una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) con capacidad de atender la demanda de aproximadamente diez mil (10.000) usuarios, entre docentes, personal administrativo y de servicios, estudiantes y visitantes, entre otros (Universidad Autónoma en Cifras, 2019). Esta planta de tratamiento consta de un proceso de filtración y otro de desinfección previos a la distribución.

De acuerdo con la normatividad colombiana vigente el agua para consumo humano debe cumplir con ciertas características fisicoquímicas para que la salud humana no se vea afectada, por lo que se deben realizar análisis básicos en los cuales se determinen turbiedad, color aparente, pH, cloro residual libre o residual de desinfectante usado, coliformes totales y *Escherichia coli* (Resolución 2115 de 2007).

El cloro residual libre es el responsable de la destrucción de los agentes patógenos y adicionalmente contribuye a mejorar las condiciones organolépticas del agua (color, sabor y olor) por lo cual es de suma importancia que se encuentre en un valor que asegure su acción desinfectante y se eliminen los riesgos microbiológicos sin que se generen subproductos peligrosos. Actualmente la normatividad colombiana vigente exige una concentración comprendida entre 0,3 y 2,0 mg/L de cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución de agua para consumo.

De acuerdo con lo anterior, es de suma importancia preguntarse si en la red de distribución de agua potable de la Universidad Autónoma de Occidente, ¿se cumple con el parámetro de cloro residual libre según la normatividad colombiana vigente para el sector de agua potable, o si es necesario optimizar el proceso de desinfección para garantizar un cloro residual libre durante toda la jornada académica y laboral?

2. JUSTIFICACIÓN

La calidad de agua para el consumo humano es de vital importancia para preservar la salud a la comunidad que se le suministra el servicio, en este caso particular a la comunidad de la Universidad Autónoma de Occidente, sede Valle de Lili; es prioritario establecer mecanismos de mejora, fundamentados en la evaluación periódica de la calidad del agua con los recursos necesarios para su análisis.

El cloro es la sustancia más usada en el mundo como desinfectante para el agua de consumo humano ya que por su poder oxidativo es capaz de destruir agentes patógenos capaces de producir infecciones, además resulta ser un insumo de bajo costo y fácil aplicación (Agbar agua, s.f., párr. 1-2). La aplicación adecuada de cloro debe ser suficiente para garantizar un valor óptimo de cloro residual libre en la red de distribución que proteja al agua de una posible contaminación, este es el indicador de potabilidad microbiológica del agua (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012, p. 21) y se denomina como aquella porción que queda en el agua después de un período de contacto definido, que reacciona química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ion hipoclorito (Hilleboe, 1995, p. 7).

En ocasiones los niveles de cloro en el sistema pueden estar por fuera del rango de lo permisible por la normativa colombiana vigente, no obstante cuando los niveles exceden el valor máximo no se considera como un peligro para la salud humana, según la OMS no se han observado efectos adversos por concentraciones elevadas aunque sí recomienda que el límite sea una concentración de 5 mg/L en la red de distribución (Agbar agua, s.f., párr. 5); por otro lado, cuando el valor del cloro residual libre es inferior se considera que el agua podría generar un potencial riesgo microbiológico en caso que se vea expuesta a agentes patógenos, ya que no se contaría con un efecto residual del desinfectante, por esto es tema de interés público que en el servicio de prestación de este recurso se garantice la calidad del mismo.

En efecto, la UAO al contar con su propio servicio de abastecimiento se encuentra en la obligación de garantizar a las casi 10.000 personas (Universidad Autónoma en Cifras, 2019) que hacen parte de la comunidad consumidora, una adecuada prestación del servicio de agua potable, es decir, que el agua que se suministra debe tener concentraciones de cloro residual dentro del rango de 0,3 mg/L a 2 mg/L estipulado en la resolución 2115 de 2007 en toda la red de distribución y durante toda la jornada.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Formular alternativas de mejora para el proceso de desinfección en la PTAP de la Universidad Autónoma de Occidente, sede Valle del Lili.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la variabilidad de la concentración de cloro residual libre en la red de distribución de agua para consumo de la Universidad Autónoma de Occidente, teniendo en cuenta la Resolución 2115 de 2007.
- Identificar los aspectos operacionales de la etapa de desinfección dentro del proceso de potabilización.
- Proponer acciones de mejora para el proceso de desinfección de la planta de tratamiento de agua potable en la Universidad Autónoma de Occidente.

4. ANTECEDENTES

Con relación a la problemática expuesta se tomaron como referencia algunos estudios desarrollados que resultan ser significativos en el tema de cloración en sistemas de potabilización de agua para consumo humano, los cuales se describen a continuación. En primer lugar, se exponen en el numeral 6.1 los trabajos realizados a nivel local en otros países distintos a Colombia y en segundo lugar se indican en el numeral 6.2 los trabajos y avances llevados a cabo en territorio nacional.

4.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

- Murillo Cuevas (2015) en su estudio: “Control estadístico de la calidad del agua respecto al cloro residual y turbidez en la planta de tratamiento SEDAJULOACA de 2015”; realizó una investigación, con el fin de determinar mediante herramientas estadísticas si la calidad del agua en la planta de tratamiento EPS SEDAJULIACA S.A cumplía con los parámetros establecidos por el Ministerio de Salud. La metodología usada en este estudio descriptivo aplicativo fueron las cartas de control de Walter A. Stewart para variables cuantitativas. En esta investigación se obtuvo que el proceso es capaz de cumplir con el reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano establecido por el ministerio de Salud, lo cual concluye que el cloro residual y la turbidez del agua de la planta de tratamiento si cumplen con las especificaciones estipuladas.
- Arpi Barrera y Yunga Guamán (2017) hicieron para su trabajo de titulación de bioquímico Farmacéutico, su trabajo llamado: “Evaluación de la calidad de agua de los sectores Corazón de María y Zhirincay de la Junta Administradora de agua potable Regional Bayas del Cantón en la ciudad de Azogues”, incorpora un diseño de investigación analítica, no experimental, descriptiva y de corte transversal, conformado por un análisis estadístico y un análisis fisicoquímico y microbiológico, para el último se tomaron y analizaron 128 muestras en un periodo de 2 meses y se evaluaron los parámetros de color, turbidez, pH, conductividad, alcalinidad, dureza total, sulfatos, cloro libre, nitritos, nitratos y coliformes totales. La metodología empleada para la evaluación fisicoquímica y microbiológica constó en la recolección de muestras tomadas directamente del grifo, para la determinación del cloro libre se usó el reactivo CHLORINE FREE-DPD y los resultados del análisis en un espectrofotómetro se midieron a 530 nm. En compensación con lo anterior para el análisis estadístico se utilizó la estadística descriptiva, con la cual se obtuvieron datos como el promedio y desviación estándar para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos monitoreados. Del trabajo desarrollado se obtuvo que para ambos sectores se cumplía lo establecido por la normativa de referencia y se garantiza que

el agua distribuida era de buena calidad sanitaria y no representaba ningún riesgo para los consumidores de los sectores analizados.

- Guanuchi Quezada y Ordoñez Jara (2017) denominaron su estudio como: “evaluación del cloro residual en la red de distribución de agua potable del Cantón Azogues a través de un modelo experimental”. En este se utilizó un modelo hidráulico llamado EPANET para simular el parámetro del cloro residual libre en el agua de un sector del sistema de suministro de agua potable en la ciudad de Azogues en donde utilizan cloro como desinfectante para mantener la calidad del agua. Se tuvo como principal objetivo evaluar el comportamiento del parámetro en la red de distribución de agua potable a través de un modelo experimental, para esto determinaron inicialmente las concentraciones de cloro residual en puntos característicos de la red mediante el método DPD, con un equipo colorimétrico digital HACH 890 en lugares estratégicos para obtener las muestras significativas. Se logró determinar la cantidad de cloro necesaria para garantizar la presencia del cloro residual libre en toda la red de distribución y la aplicación del modelo permitió conocer la concentración del parámetro en cualquier punto de la red.

- Un cuarto estudio corresponde a Pérez Chanca y Ramos Castellanos (2018) se denomina: “Dosis de cloro y cloro residual libre en el sistema de agua potable del sector de Puyhuan Grande del distrito y provincia de Huancavelica-2018”. En esta investigación se tenía el propósito de evaluar la concentración de dosis de cloro presente en el reservorio suministrada por la junta administradora de servicio de saneamiento (JASS) y el cloro residual libre presente en las redes de distribución domiciliarias, para así poder comparar con el reglamento de calidad de agua para consumo humano D.S.N° 031-2010-SA en el sector de Puyhuan Grande del distrito y provincia de Huancavelica, Perú. Para medir el cloro residual libre en la red de distribución se tomaron 132 muestras en viviendas elegidas de forma aleatoria a una población de 200 viviendas conectadas a la red de distribución Pyhuan Grande y a cada una se le midió el cloro residual libre y se comparó con la dosis de cloro medida en el reservorio de la planta de potabilización. Finalmente se encontró que evidentemente existía un incumplimiento del reglamento pues la cantidad de cloro residual libre era inferior a lo establecido en algunas de las viviendas muestreadas a lo cual se le atribuyó la falta de capacitación del personal técnico operador, la falta de presupuesto, el descuido por parte de los miembros de la JASS y la falta de interés de todas las partes involucradas.

4.2 ANTECEDENTES EN EL CONTEXTO NACIONAL

- La universidad Industrial de Santander desarrolló el programa de monitoreo de agua potable - BPM para el año 2018, con el objetivo de establecer un sistema de monitoreo de la calidad del agua utilizada en todas las etapas del proceso de producción de alimentos y limpieza de utensilios, equipos e infraestructura del comedor estudiantil de la universidad. La principal fuente de suministro de agua de la institución corresponde a las plantas de tratamiento del acueducto municipal de Bucaramanga en la cual la desinfección se hace por adición de cloro. Para desarrollar el programa se pautaron análisis microbiológicos fisicoquímicos en puntos de agua de grifos que deben realizarse en dos puntos estratégicos: Llave que suministra agua para producción y llave que suministra agua para operaciones de limpieza e higiene; para medir el cloro residual libre será utilizado un test basado en colorimetría con análisis cuantitativos que funciona por la reacción de la sustancia DPD (dietil -p- fenilendiamina) con el cloro presente en las muestras de agua. Como resultado, se estableció el sistema de monitoreo de agua para las actividades de producción y limpieza de la institución, el cual consiste en actividades de muestreos microbiológicos y fisicoquímicos al agua periódicamente, análisis físico del agua y acciones correctivas en caso de no cumplir los criterios.
- Los ministerios de la protección social y de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en ejercicio de sus facultades legales expedieron la resolución 2115 de 2007 mediante la cual se señalan características instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. En esta se pauta que el control de los análisis que se tienen que realizarse en la red de distribución es deber de la persona prestadora del servicio de agua potable, se especifica que el valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L, no obstante, no se especifica en el tipo de metodologías o técnicas que apliquen.
- Un tercer documento corresponde al trabajo de grado para otra al título de ingeniero civil de Díaz Bautista (2017) titulado “Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tena en el departamento de Cundinamarca”, en el cual se plantaba el principal objetivo de lograr mejorar el sistema de tratamiento de la planta de agua potable a través del documento y con el trabajo realizado garantizar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la resolución 2115 de 2007. El trabajo fue desarrollado en tres fases: en primer lugar, un diagnóstico mediante visitas periódicas a la planta; en segundo lugar, un análisis de la información previamente recolectada y su respectivo diagnóstico técnico; finalmente la tercera fase correspondió al diseño de las alternativas que permitieran mejorar la calidad del agua, el sistema de potabilización y el uso del recurso. Los

resultados obtenidos dejaron ver que el agua efluente no cumplía con el parámetro de cloro residual y que había presencia de coliformes, por lo cual se propuso una modificación en el sistema utilizado para la cloración que consiste en un difusor de cloro con orificios para aumentar la cantidad de cloro suministrada al sistema y cumplir con la normatividad.

- En el trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería - Ingeniería Ambiental, Giraldo Atehortúa (2015) realiza la identificación de riesgos y puntos críticos de control en plantas de potabilización de agua, con el propósito de proponer una metodología para la identificación de riesgos del proceso de potabilización y la propuesta de nuevos índices para la evaluación del desempeño operativo de una planta de potabilización aplicando la metodología de Índices de Capacidad de Proceso (Cpi) logrando de esta manera que la planeación del proceso de potabilización conecte tanto la identificación de riesgos como el seguimiento de las condiciones operativas del mismo. Mediante una hibridación de la metodología de los Planes de Seguridad del Agua (PSA) de la Organización Mundial de la Salud y elementos seleccionados del Programa de Corrección por Componentes (Composite Correction Program-CCP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos se analizaron los comportamientos de las variables de turbiedad y concentración de cloro, finalmente se aplicó la metodología a un caso de estudio de una PTAP de tipo convencional con capacidad de tratamiento de 1,2 m³/s . Se expone que una gran debilidad que hay en los procesos de potabilización es la deficiente operación en estos sistemas, los cuales no están siendo controlados en muchas poblaciones por lo cual se hace importante reformular aspectos en la metodología de gestión de la operación en las plantas de potabilización planteada desde las metas gubernamentales de los organismos de control del país para o afectar la seguridad del agua suministrada a la población.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua es un tratamiento que consiste básicamente en la eliminación de turbiedad, de impurezas de distinto tipo, para obtener agua potable (Servicios de aguas de misiones S.A.- SAMSA, 2008, p. 3). Este procedimiento incluye una serie de procesos que deben cumplirse de manera continua para suministrar el servicio de prestación de agua a las comunidades.

5.1.1 Pretratamiento

Antes de proceder a distribuir el agua para consumo humano, se captan las aguas crudas de una fuente hídrica y se someten a ciertos tipos de operaciones físicas que tienen como objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que, por su naturaleza o tamaño, representan un riesgo para la salud (Casero Rodríguez, 2008, p. 10).

En esta etapa se extraen sólidos gruesos como piedras y arenas para evitar la colmatación y degradación de unidades posteriores. Esto se logra extrayendo agua de una fuente hídrica y luego se pasa por rejillas que retienen los sólidos mencionados anteriormente y dependiendo el caso también remueven sustancias de difícil tratamiento como grasas y flotables, no obstante, estas operaciones son en su mayoría propias del tratamiento de aguas residuales y raramente se emplean en el tratamiento de agua potable (Casero Rodríguez, 2008).

5.1.2 Coagulación

Es el proceso del tratamiento que tiene por objeto agrupar las partículas dispersas en el agua en otras más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua. Los ingredientes químicos que se agregan al agua cumplen la función de desestabilizar las partículas disueltas lo cual permite que se agrupen, un coagulante altamente conocido en el mercado es el sulfato de aluminio (Casero Rodríguez, 2008, p. 20).

5.1.3 Floculación

Consiste en someter el agua a un movimiento que promueve la aglomeración de las partículas disueltas dando como resultado moléculas de mayor tamaño, a estas se les denomina flóculos. El movimiento puede ser producido por acciones mecánicas o por agitación hidráulica (SAMSA, 2008, p. 4).

5.1.4 Decantación

Después del agua haber pasado por las unidades de floculación es conducida a tanques de decantación, en los cuales se permite la decantación de las moléculas aglomeradas. Para completar este proceso el agua debe permanecer en los tanques por un periodo establecido para permitir la extracción del material decantado (SAMSA, 2008, p. 4).

5.1.5 Filtración

La extracción del material decantado no representa en su totalidad el tratamiento suficiente del agua, por lo que se requiere la clarificación del agua mediante la filtración, este proceso consiste en la aplicación de medios filtrantes que retienen la materia que se encuentra en suspensión. Muchos de los medios filtrantes utilizados están constituidos por arenas, carbón activado, o demás materiales granulados (SAMSA, 2008, p. 5).

5.2 AGUA POTABLE

El Decreto 1575 de 2007 define como agua potable o agua apta para consumo humano, aquella que por sus características físicas, químicas y microbiológicas no representan riesgos a la salud humana en su consumo, en las condiciones que las normas las reglamenten, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal (Decreto 1575 de 2007).

5.2.1 Características físicas

Se denominan así a aquellas características que son perceptibles a los sentidos (vista, olfato, etcétera) y tienen incidencia sobre las condiciones estéticas del agua (Barrenechea Martel, s.f., p. 5). Se consideran importantes las siguientes:

Turbiedad, sólidos solubles e insolubles, color, olor, sabor y temperatura (Barrenechea Martel, s.f., p. 5).

5.2.2 Características químicas

Son características de sustancias que tienen incidencia en la salud humana, en relación con los elementos de la tabla periódica, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos, todos estos pueden ser de origen natural o industrial. Entre estas se encuentran: Carbono Orgánico Total, nitritos, nitratos, arsénico, mercurio, plomo, dureza total, residual de aluminio, cloro residual libre, entre otras (Resolución 2115 de 2007, p. 3).

5.2.3 Características microbiológicas

Hacen referencia a los microorganismos y demás elementos biológicos presentes en el agua. El origen de los microorganismos puede ser natural, es decir constituyen su hábitat, pero también provenir de la contaminación (Orellana, 2005).

5.3 DESINFECCIÓN

Es el proceso que consiste en eliminar microorganismos infecciosos mediante el uso de agentes químicos o físicos (Stanton Block, 1991). En el proceso se destruyen también otras bacterias, sin embargo, no se obtiene la esterilización completa (Casero Rodríguez, 2008). Cuando una población microbiana es expuesta a un agente letal físico o químico, se produce una progresiva reducción del número de organismos en función del tiempo, existen además un conjunto de condiciones que afectan el proceso:

5.3.1 Concentración del agente

Componente fundamental de los sistemas de tratamiento para lograr la reducción necesaria del riesgo microbiano (OMS, 2006, 59). Aunque varía según el desinfectante y el microorganismo, existe una relación inversamente proporcional entre concentración y tiempo de exposición; también se modifica la cinética de muerte de los microorganismos. Este factor es tan crítico, que se sabe que concentraciones mínimas de casi cualquier desinfectante no solo no eliminan los microorganismos, sino que permiten su desarrollo (Vignoli, 2008, p. 611).

5.3.2 Tiempo de contacto

Dada una concentración de desinfectante, existe un tiempo mínimo de acción que hay que respetar para conseguir la acción desinfectante, la Organización Mundial de la Salud recomienda que sea de al menos 30 minutos cuando se usa Cloro como sustancia desinfectante (2006, p. 164).

5.3.3 pH

Este parámetro afecta tanto a la carga superficial neta de la bacteria y determina el grado de ionización del agente, siendo en general no disociada la que atraviesa mejor las paredes del microorganismo (Vignoli, 2008, p. 611). Es necesario conocer el pH del agua porque cuanto más alcalina sea mayor será el tiempo de contacto necesario o mayor será la concentración de cloro libre residual al final del tiempo de contacto necesaria para una desinfección adecuada (OMS, 2006, p. 95)

5.3.4 Temperatura

Existe la relación proporcional en la que el aumento de temperatura aumenta el poder bactericida del agente, siempre que no lo desnaturalice. Para muchos agentes desinfectantes, por cada 10° C de incremento de esta, la tasa de mortalidad de los microorganismos se duplica (Vignoli, 2008, p. 612).

5.4 DESINFECCIÓN CON CLORO

Según Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía en su trabajo de grado (2008) exponen que la popularidad de este desinfectante en el tratamiento de agua se basa en los siguientes factores:

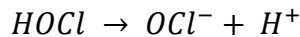
- **Cualidades residuales:** El cloro produce una acción desinfectante residual sostenida. La presencia del residuo sostenido mantiene la higiene del agua potable hasta que llega al consumidor.
- **Control del gusto y olores:** La cloración del agua para consumo humano reduce los gustos y olores, el cloro oxida muchas sustancias que se presentan naturalmente.

- Control químico: El cloro en el tratamiento del agua destruye el sulfuro de hidrogeno y elimina el amoniaco y otros compuestos nitrogenados que tienen sabores desagradables y obstaculizan la desinfección

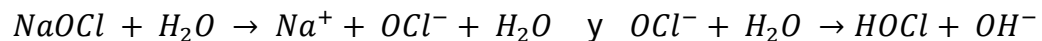
El cloro rompe uniones químicas moleculares, ya que pueden intercambiar átomos con otros compuestos. En tratamiento de agua el cloro se usa como gas generado a partir de la vaporización de cloro líquido almacenado bajo presión en cilindros. Su reacción en el agua se da de la siguiente forma:



Según la Asociación española de abastecimiento de agua y saneamiento en su manual de cloración, la adición del cloro gaseoso al agua produce una mezcla de ácido clorhídrico (HCL) y ácido hipocloroso (HOCl), como resultado baja la alcalinidad y el pH del agua, esta reacción tiene lugar en pocos segundos. El ácido hipocloroso es el desinfectante más efectivo, este se ioniza en función de la temperatura y el pH de la disolución para formar ion hipoclorito de manera instantánea y reversible de la siguiente forma:

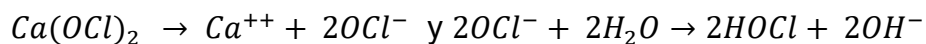


Si la dosificación de cloro se hace con hipoclorito de sodio se tiene que:



En este caso se presenta un aumento de alcalinidad según la magnitud con que el OCl⁻ reaccione con el agua.

Si el cloro se agrega como hipoclorito de calcio se tiene que:



Teniendo como consecuencia un aumento de la alcalinidad y de la dureza total del agua.

6. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente, que se encuentra ubicada en el kilómetro 2 de la vía Cali-Jamundí (Ver Figura 1).

Figura 1

Ubicación de la Universidad Autónoma de Occidente



Nota. Google. (s. f.). [Figura tomada de Google Maps para ubicar la Universidad Autónoma de Occidente]. Recuperado 2019, desde [https://www.google.com/maps/place/Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Occidente/@3.353936,-](https://www.google.com/maps/place/Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Occidente/@3.353936,-76.5245147,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e30a1bce83eb4eb:0x374b9a9955d030e8!8m2!3d3.353936!4d-76.522326)

[76.5245147,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e30a1bce83eb4eb:0x374b9a9955d030e8!8m2!3d3.353936!4d-76.522326](https://www.google.com/maps/place/Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Occidente/@3.353936,-76.5245147,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e30a1bce83eb4eb:0x374b9a9955d030e8!8m2!3d3.353936!4d-76.522326).

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

De acuerdo con la resolución 0811 de 2008, del Ministerio de Protección Social de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, artículo N°3, el número mínimo de puntos de muestreo en la red de distribución para efecto de un adecuado control y vigilancia que corresponden a la institución es de 5, considerando la población atendida por la Universidad, que se encuentra en el rango de 2501 a 10000 personas. Sin embargo, basándose en los criterios que fueron considerados para

localizar los puntos de muestreo, se procedió a distinguir 10 puntos de muestreo representativos del sistema. Dichos criterios fueron adaptados de la resolución 0811 de 2008, artículo N°2 “criterios para puntos de recolección de muestras en red de distribución”:

- Inmediatamente después del accesorio o componente donde termina la tubería de conducción y se da inicio a la red de distribución.
- En el extremo más alejado de la red de distribución, que sea más representativa la calidad del agua.
- A la salida de la infraestructura ubicada en la red de distribución que puede representar riesgo de contaminar el agua para consumo humano, tales como tanques de almacenamiento o compensación y los sistemas de bombeo con almacenamiento en la succión.

Los 10 puntos de muestreo seleccionados se encuentran identificados, indicando el dato de localización en el plano de la red de distribución (Ilustración 2).

6.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS OPERACIONALES DE LA ETAPA DE DESINFECCIÓN DENTRO DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

Durante esta fase del proyecto se realizó una visita a la PTAP para identificar específicamente los componentes del tratamiento y poder llevar a cabo las actividades de la Tabla 1.

Tabla 1.

Actividades para la identificación de los aspectos operacionales de la etapa de desinfección

Actividad	Descripción	Recursos requeridos	Ver resultado
Reconocimiento del sistema de potabilización de agua en la Universidad Autónoma de Occidente	Revisión de las condiciones de operación, identificando: dimensiones, materiales, componentes del proceso de desinfección y demás condiciones que influyan sobre la desinfección en la PTAP	Guantes, tapabocas, bata, bitácora y papelería para registro de información.	Sección 9.3.1
Diagnóstico operacional de las etapas de operación en la PTAP de la UAO	Diagnóstico del proceso actual de desinfección para las cuatro unidades que componen actualmente a la PTAR de la UAO; teniendo en cuenta los manuales de funcionamiento, compilación de datos poblacionales actuales, además de las instalaciones de seguridad y de control-dosificación.	Papelería para registro de información, personal planta física.	Sección 9.3.2

Tabla 1.(Continuación)

Actividad	Descripción	Recursos requeridos	Ver resultado
Muestreos	Recolección de muestras representativas del agua tratada.	Guantes, recipientes de vidrio, cronómetro.	Sección 9.1
Caracterización del Cloro residual libre	Se realizarán pruebas de medición del cloro residual libre del agua tratada.	Equipo DR900 HACH, celdas de vidrio con capacidad de 10 mL, sobres de reactivo DPD marca HACH, lejía, agua desionizada, guantes, bitácora.	Sección 9.2

Nota: Descripción de las actividades a desarrollar en la etapa de identificación de aspectos operacionales de la PTAP. Adaptado de: “Propuesta para el mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Bituima, Cundinamarca”, por Sánchez Gamba S.M. y Peña Bernal M.P., 2011, https://www.academia.edu/39224730/PROPUESTA_PARA_EL_MEJORAMIENTO_DE_LA_PLANTA_DE_TRATAMIENTO_DE_AGUA_POTABLE_DEL_MUNICIPIO_DE_BITUIMA_CUNDINAMARCA *Integrantes del proyecto*. En el dominio público.

Adicionalmente se realizó un registro de control a partir de la información que la institución maneja como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento de la planta de potabilización, el cual se mantendrá actualizado con los ítems descritos en la Tabla 2.

Tabla 2.

Ítems a analizar según la información manejada por la UAO como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento de la planta de potabilización

Ítem	Unidades
Cantidad de agua captada a la entrada de la planta de tratamiento	m ³
Cantidad de agua suministrada en la red	m ³
Resultado de los análisis microbiológicos, físicos y químicos del agua realizados por la universidad como parte de sus actividades de control	Según aplique
Cantidad y tipo de productos químicos utilizados en el tratamiento de potabilización del agua	cantidad, ppm
Registro de novedades presentadas como anomalías, emergencias, problemas en equipos y personal, calidad de insumos y actos de orden público que puedan afectar la calidad en la prestación del servicio	Según aplique
Resultados de las evaluaciones de demanda de cloro u otro desinfectante	mg/L

6.3 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN

6.3.1 Análisis de la calidad inicial de la fuente de abastecimiento

Como fuente de abastecimiento, la UAO cuenta las aguas subterráneas provenientes de un pozo ubicado a 160 m de profundidad aproximadamente, actualmente se capta un caudal de 92 GPM por una tubería de 3" de diámetro (Leyton Flor y Contreras Rengifo, 2015, p. 21). Dadas estas características y con el fin de establecer el desempeño de la etapa de desinfección, se realizó la caracterización inicial del agua cruda, para lo cual se estableció tomar una muestra de agua a la entrada de la PTAP y realizar la medición de los parámetros de calidad del agua que se especifican en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros para evaluación de la calidad del agua cruda de la fuente de abastecimiento

Parámetro	Unidades	Método de medición
pH	Unidades	SM4500 H ⁺ B
Temperatura	°C	SM2550 A
Alcalinidad	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método HACH SM2320 B
Dureza Total	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método HACH titulación con Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), método 8222
Coliformes Totales	UFC/100 mL	Filtración por membrana con medio de cultivo m_Coliblue

6.3.2 Análisis de la calidad del agua para consumo humano en términos del proceso de desinfección

De los 5 muestreos mensuales que se tomaron en los 10 puntos establecidos en la red de distribución, se les midió la concentración de cloro residual libre y finalmente se seleccionó una de las muestras a la cual se le midieron todos los parámetros que se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4.*Parámetros para evaluación de la calidad del agua para consumo humano*

Parámetro	Unidades	Método de medición
pH	Unidades	SM4500 H ⁺ B
Temperatura	°C	SM2550 A
Alcalinidad	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método HACH SM2320 B
Dureza Total	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método HACH titulación con Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), método 8222
Coliformes Totales	UFC/100 mL	Filtración por membrana en Agar Chromocult
Cloro Residual Libre	mg/ L de cloro residual libre	Método HACH DPD 2101906

6.3.3 Ensayos de demanda de cloro

Con los ensayos se estableció la dosis de desinfectante - cloro en este caso -, para la cual se obtiene una concentración de cloro residual libre idónea para su aplicación en planta, de tal manera que se garantice el cumplimiento de lo exigido por la resolución 2115 de 2007. Se realizaron 3 ensayos para asegurar la confiabilidad y reproducibilidad en los resultados.

En primera instancia, se establecieron las tres dosis óptimas de desinfectante y posteriormente se evaluaron esas tres dosis establecidas en los 3 ensayos establecidos identificando la variación del cloro residual libre en el transcurso del tiempo, y posteriormente se determinó la cantidad adecuada de desinfectante para garantizar que el parámetro de cloro residual libre se ajustara a la normatividad colombiana vigente. Para cada ensayo se evaluó la variación de la concentración residual del desinfectante en intervalos de 30 minutos.

6.4 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UAO

Se formularon propuestas en pro de garantizar la concentración adecuada del desinfectante en toda la red de distribución para la eliminación de los riesgos

microbiológicos, y que se encuentre dentro del rango definido por la normativa colombiana vigente, durante toda la jornada de atención de la Universidad Autónoma de Occidente. Las alternativas propuestas están orientadas a promover cambios en los ítems descritos en la Tabla 5.

Tabla 5.

Aspectos a considerar para la formulación y diseño de alternativas de mejora para el proceso de desinfección

Aspecto	Descripción
Operación y mantenimiento	Se deben proponer mejoras que impacten las actividades de operación y mantenimiento de las unidades involucradas en el proceso de desinfección.
Desinfección	Fortalecer el proceso mediante la incorporación de nuevos procesos y/o unidades.
Dosificación	Proponer dosificaciones en función de la demanda de cloro.
Personal	Capacitación del personal de operación y mantenimiento.

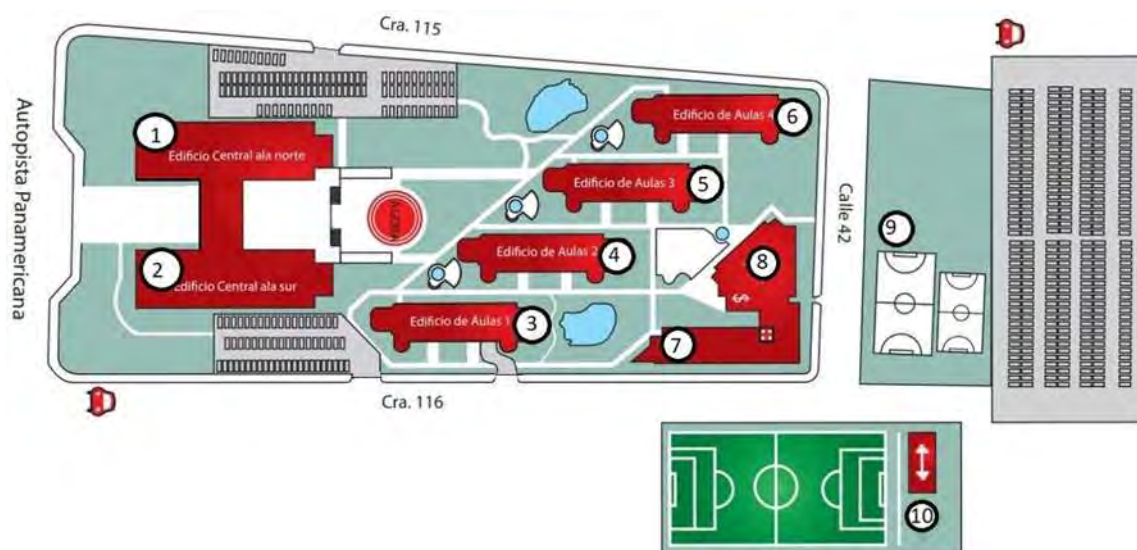
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS Y LA FRECUENCIA DE MUESTREO

Para conseguir una adecuada cobertura en la red de distribución de la Universidad, se determinaron 10 puntos para toma de muestras (Ilustración 2 y Tabla 6), basados en los “criterios para puntos de recolección de muestras en red de distribución” de la resolución 0811 de 2008, artículo N°2. En estos puntos, se tomaron las muestras para la evaluación de la calidad del agua para consumo humano.

Figura 2.

Puntos de muestreo en la red de distribución de agua potable en la UAO



Nota. Ubicación de los puntos de muestreo en el Mapa de la UAO. Tomado de: "Mapa web" por Universidad Autónoma de Occidente, 2019. https://www.uao.edu.co/sites/default/files/mapa_web.pdf. En el dominio público.

Tabla 6.

Ubicación de los puntos de muestreo de la calidad del proceso de desinfección

Punto	Descripción
1	Baño de mujeres cuarto piso del Ala Norte
2	Baño de mujeres tercer piso del Ala Sur
3	Baño de mujeres cuarto piso de Aula 1
4	Baño de mujeres cuarto piso de Aula 2
5	Baño de mujeres cuarto piso de Aula 3
6	Baño de mujeres cuarto piso de Aula 4
7	Baño de mujeres del edificio de Bienestar Universitario
8	Baño de mujeres del segundo piso de la Cafetería
9	Grifo de Cancha de Fútbol Sala
10	Baño de mujeres de la Unidad de Acondicionamiento Físico

Dado lo anterior, el muestreo en los 10 puntos identificados se realizó ~~5 veces~~; dicho de otra forma, por cada punto se hizo el seguimiento de la variación de la concentración de cloro residual libre en la red de distribución a lo largo del día, durante 5 días.

7.2 ANÁLISIS LA VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, TENIENDO EN CUENTA LA RESOLUCIÓN 2115 DE 2007

Se realizaron los 5 muestreos establecidos; cada muestreo corresponde a una jornada diaria de recolección de datos, en los 10 puntos determinados en la red de

distribución de agua potable en la UAO. En cada punto se midió la concentración de cloro residual libre (mgCl_2/L) con el método HACH DPD 2101906 por colorimetría, empleando el DR 900 de HACH (Figura 3).

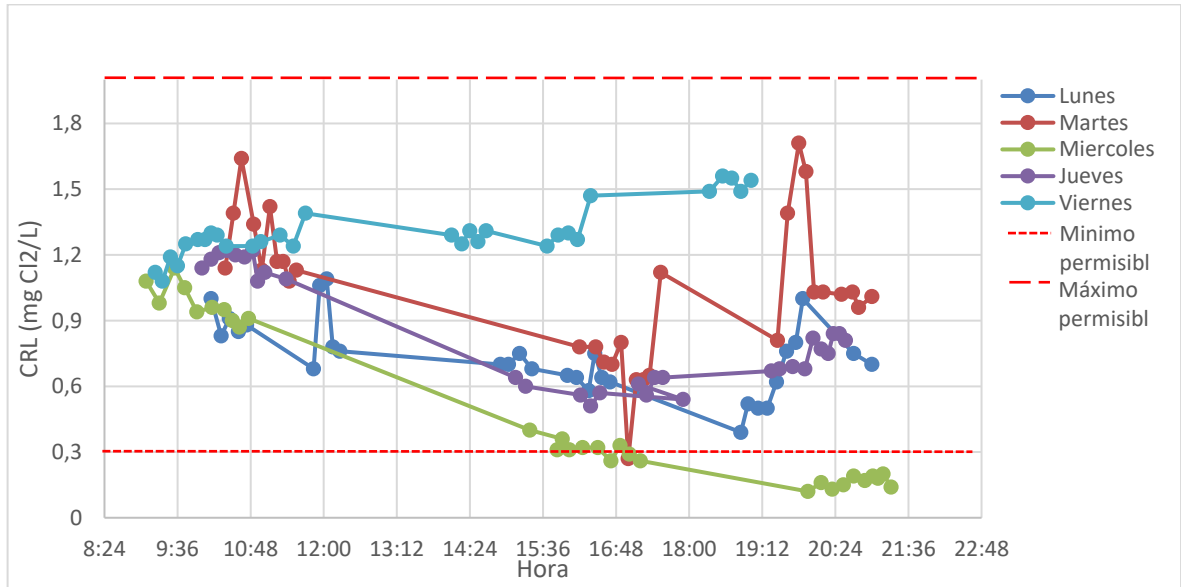
Figura 3.
DR 900 de HACH



Nota. Equipo utilizado para la determinación de la concentración de CRL en la red de distribución de agua potable.

La variación de la concentración de cloro residual libre en la red de distribución para la semana de prueba comprendida entre el 24 febrero y el 2 de marzo de 2020, desde las 8:24 a.m. hasta las 9:30 p.m. se muestra en la figura 4.

Figura 4.
Monitoreo del Cloro Residual Libre



Nota: Tendencia de la concentración de cloro residual libre en la red de distribución de la UAO, en la semana del 24 de febrero al 2 de marzo de 2020.

Para el día miércoles (línea verde), se evidenció una disminución de la concentración de cloro más evidente que los demás días; este comportamiento es esperado, ya que es el día de mayor flujo de personas dentro de la institución, también se aprecia que alrededor de las 16:30 horas, las concentraciones de CRL se encuentran por debajo de lo que se exige en la norma, por lo cual no se garantiza que, a partir de esta hora, el agua cumpla con la calidad microbiológica sin representar un riesgo para los consumidores. Contrario al comportamiento del miércoles, el viernes representado por la curva azul claro; en este día usualmente la Universidad tiene el menor flujo de estudiantes de la semana, por ende, menor consumo de agua. Esto refleja las fluctuaciones de la concentración de CRL que corresponden a las tres dosificaciones diarias realizadas en la mañana, medio día y tarde por el personal encargado de la PTAP. El comportamiento de este día fue similar en los muestreos de los lunes, martes y jueves. En todos ellos, las concentraciones de CRL cumplen con lo que exige la resolución 2115 de 2007 y se garantiza la inocuidad del agua.

Este estudio muestra que es necesario proponer adecuaciones al proceso de desinfección en la PTAR de la UAO, debido a que tal y como se muestra en la Ilustración 3, hay puntos en el gráfico que corresponden a valores por debajo del

límite inferior sugerido en la resolución 2115 de 2007, para los martes y miércoles, aproximadamente a las 4:50 p.m. y 3:30 p.m. respectivamente.

En este ensayo también pudo determinarse que la dosis de Cl₂, empieza a decaer a las 4 horas de la dosificación para los cinco días de la semana; esto se hace más evidente en los días de mayor flujo de estudiantes, sin embargo, este comportamiento evidenciado durante el monitoreo muestra un comportamiento típico y esperado, ya que a medida que pasa el tiempo se va consumiendo o volatilizando el CRL.

7.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS OPERACIONALES DE LA ETAPA DE DESINFECCIÓN DENTRO DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN

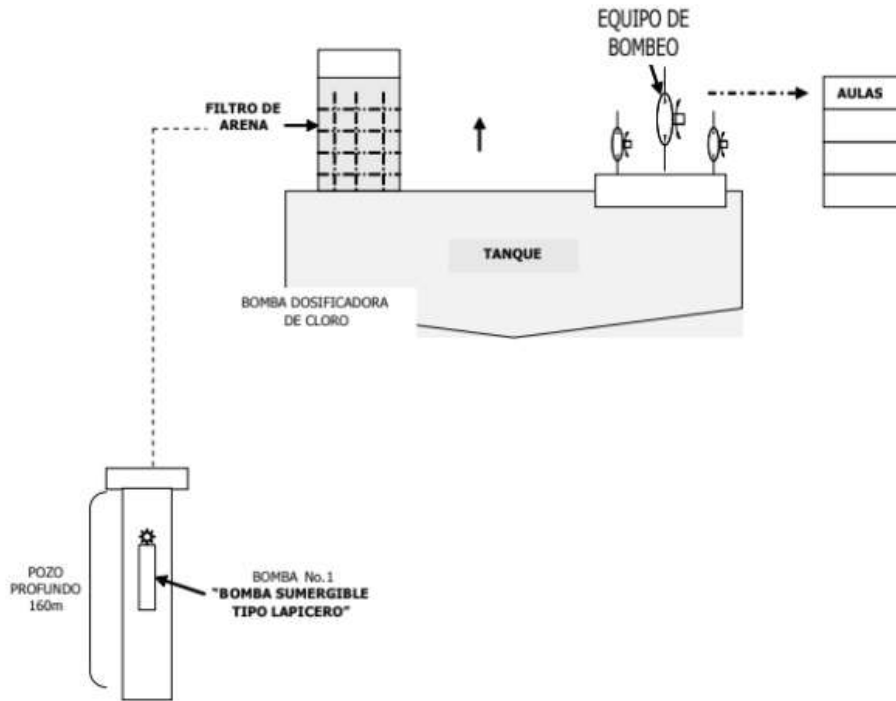
7.3.1 Reconocimiento del sistema de potabilización de agua en la universidad autónoma de occidente

Para identificar asertivamente los aspectos operacionales de la etapa de desinfección, es importante conocer la estructura del sistema de potabilización. La PTAP de la UAO tiene un conjunto de componentes diseñados para captar, conducir, tratar, almacenar y distribuir el agua potable a los usuarios del campus de Valle del Lili, cumpliendo con los requisitos exigidos en el Decreto 1575 de 2007 del 09 mayo de 2007 del Ministerio de Protección Social y la Resolución 2115 de junio de 2007 del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Departamento de planta física de universidad Autónoma de Occidente, s.f.).

Según información brindada por el personal del departamento de planta física, la PTAP está diseñada para trabajar a alta carga, con una capacidad de 480 GPM y su funcionamiento está dado por los componentes: fuente de abastecimiento, planta de tratamiento, sistema de distribución y sistema de cloración. Su esquema está gráficamente descrito en la Figura 5.

Figura 5.

Esquema del sistema de potabilización de agua en la Universidad Autónoma de Occidente



La fuente de abastecimiento consiste en un pozo de 160 m de profundidad, la extracción del agua se realiza mediante una tubería de acero al carbono de 8" x 5/16", la cual tiene instalada una bomba tipo lapicero a 42 m de profundidad, con motor eléctrico, desde la que se transporta el agua hasta la entrada de la planta, a través de una tubería de 3" de diámetro y un caudal de 92 GPM.

La planta de tratamiento de agua potable está compuesta por una unidad de filtración directa y un tanque de almacenamiento. El filtro contiene una estructura de concreto reforzado de 1.5 m de ancho por 2.5 m de largo y 3.9 m de altura total, con una máxima capacidad de tratamiento de 5.37 L/s. Como medio filtrante se utiliza una capa de arena de cantera lavada de 0.60 m de profundidad colocada sobre una capa de carbón activado de 0.3 m, el cual descansa sobre una capa de gravas de cuarzo de 0.60 m de profundidad y con diversa granulometría en su conformación. La capa más gruesa de la grava descansa sobre un falso en plaquetas de concreto con orificios de diámetro 17 mm.

Figura 6.

Vista externa del sistema de filtración de la PTAP de la UAO.



El agua pasa del filtro al tanque de almacenamiento a través de una tubería de 6" de diámetro, para el almacenamiento del agua tratada se dispone de un tanque con losas superior e inferior y paredes en concreto reforzado con dimensiones de 8 m de largo, 6.5 m de ancho y 4.45 m de altura total, su volumen útil es de 165 m³.

Figura 7.

Tanque de almacenamiento de agua filtrada de la PTAP de la UAO



El sistema de distribución inicia con un sistema de bombeo de presión constante compuesto por tres bombas de flujo horizontal para cumplir con el caudal de 480 GPM. La bomba líder cubre la demanda de bajos consumos y en caso de requerirse para demandas mayores, las dos bombas auxiliares participan en la estabilización de la presión.

Figura 8.

Sistema de bombeo de la PTAP de la UAO



Para el sistema de cloración se dispone de un tanque plástico de 500L, en el cual se prepara la solución de 500 L de agua con 600 g de hipoclorito de calcio al 70%. Durante un día se preparan 3 dosificaciones y se aplican por goteo permanente al tanque de almacenamiento (Departamento de planta física de universidad Autónoma de Occidente, comunicación personal, 2020).

Figura 9.

Tanque de mezcla de la solución clorada para la desinfección del agua de la PTAP de la UAO



7.3.2 Diagnostico operacional en las etapas de operación de la PTAP

Como parte del diagnóstico operacional de la PTAP de la UAO, se realizó la evaluación de las etapas de tratamiento como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Diagnóstico operacional de las etapas de la PTAP de la UAO

Etapa/Unidad	Estado	Hallazgos	Figura
Filtración	<i>Bueno</i>	<i>Mantenimiento cada 8 días, cambio de arena periódico.</i>	<i>Figura 6</i>
Almacenamiento	<i>Bueno</i>	<i>No se especifica mantenimiento ni limpieza</i>	<i>Figura 7</i>

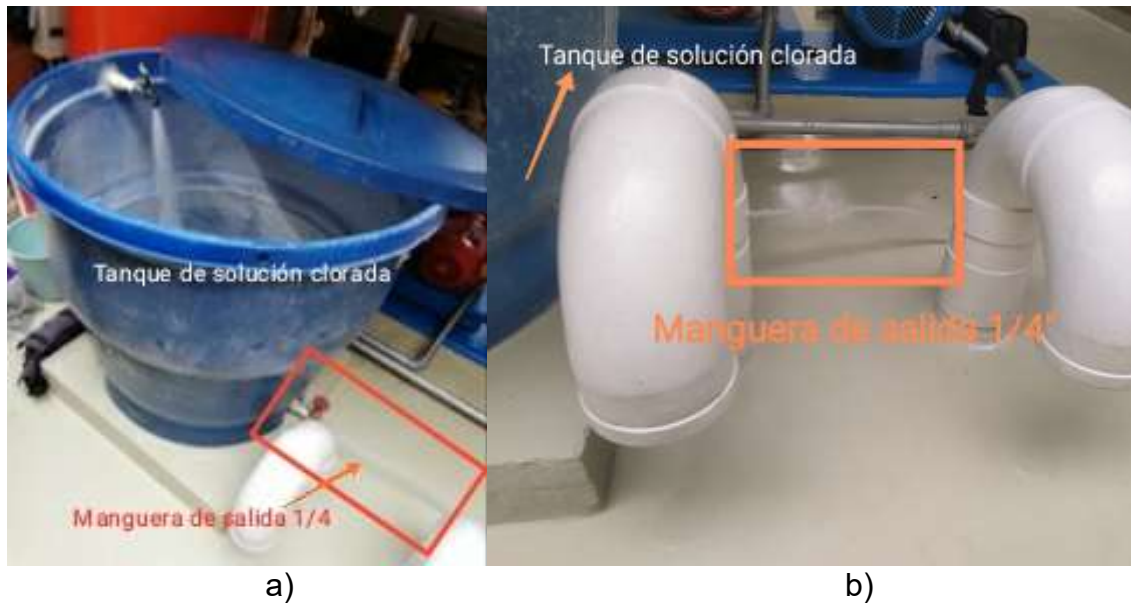
Tabla 7 (Continuación)

Etapa/Unidad	Estado	Hallazgos	Figura
Desinfección	<i>Regular</i>	<i>Presenta obstrucción en la manguera de salida del tanque de desinfección</i>	<i>Figura 9</i>
Bombeo	<i>Bueno</i>	<i>Se encuentra funcionando en óptimas condiciones</i>	<i>Figura 8</i>

La infraestructura se encuentra en buenas condiciones y el proceso se desarrolla eficientemente, al estar libre de aspectos como: daños por fisuras, corrosión, erosión, oxidación, fugas, desgastes o deformaciones. En general, los componentes del sistema de potabilización se encontraron en correcto funcionamiento y estado, a excepción del tanque plástico destinado para preparación de la mezcla de la solución clorada; ya que en la parte inferior de éste se encuentra la salida de la solución desinfectante hacia el tanque de almacenamiento, dicha salida consiste en una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada, que se abre por medio de una llave de paso; esta manguera se suele atascar, por lo tanto se debe realizar un mantenimiento frecuente y permanente, según el reporte del operario de la PTAR (Figura 10).

Figura 10.

Manguera de salida del tanque de mezcla de la solución clorada



Nota. Manguera de ¼ de pulgada para la salida de la solución clorada hacia el tanque de almacenamiento del agua filtrada. 2020.

La fase de diagnóstico culminó con el registro de control de la información que maneja la Universidad Autónoma de Occidente como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento de la planta de potabilización, el resultado de dicha actividad se puede contemplar en la tabla 8.

Tabla 8.

Información obtenida por parte de la institución como parte de sus actividades de operación, control y mantenimiento

Ítem	Datos Obtenidos	Unidades	Fuente
Cantidad de agua captada a la entrada de la planta de tratamiento	235	m ³ /d	Departamento planta física
Cantidad de agua suministrada en la red	205	m ³ /d	Departamento planta física
Resultado de los análisis microbiológicos, físicos y químicos del agua realizados por la universidad como parte de sus actividades de control	No corresponde	Según aplique	-
Cantidad y tipo de productos químicos utilizados en el tratamiento de potabilización del agua	Hipoclorito de calcio al 70%, se realizan 3 dosificaciones diarias de 600 g cada una	cantidad, ppm	Departamento planta física

Tabla 8 (Continuación)

Ítem	Datos Obtenidos	Unidades	Fuente
Registro de novedades presentadas como anomalías, emergencias, problemas en equipos y personal, calidad de insumos y actos de orden público que puedan afectar la calidad en la prestación del servicio	Visitas periódicas de la autoridad ambiental para revisar el estado del pozo subterráneo que funciona como fuente de abastecimiento.	Según aplique	Departamento planta física
Resultados de las evaluaciones de demanda de cloro u otro desinfectante	No corresponde	mg/L	-

7.4 ANÁLISIS DE LA CALIDAD INICIAL DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO

Para analizar la calidad del proceso de desinfección se comenzó con la caracterización del agua cruda proveniente del pozo de agua subterránea el día 21 de enero de 2020, para esto se tomó una muestra en un recipiente de vidrio previamente esterilizado en un grifo ubicado en la tubería de entrada a la planta de tratamiento. Para probar los parámetros de alcalinidad y dureza se analizaron muestras de 50 mL. Los resultados de la caracterización del agua de la fuente de abastecimiento se encuentran expresados a continuación en la tabla 9.

Tabla 9.*Evaluación de la calidad del agua cruda de la fuente de abastecimiento*

PARAMETRO	UNIDADES	FUENTE ACEPTABLE	RESULTADO
pH	Und	6.0 - 8.5	7,41
Temperatura	°C	-	
Alcalinidad	mg CaCO ₃ / L	≤ 200	170
Dureza total	mg CaCO ₃ / L	≤ 300	172,156
Coliformes totales	UFC/ 100 mL	0 - 50	17

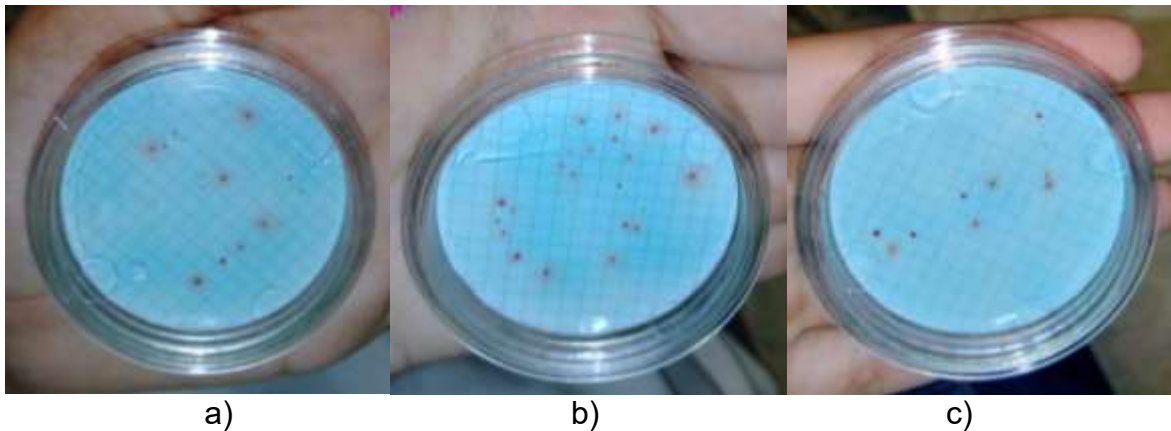
Se obtuvo que el pH del agua cruda es de 7.41, valor que está dentro del rango de una fuente aceptable según la Resolución 2115 de 2007. Este parámetro es muy importante porque las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH está dentro de determinado rango, aunque (LENNTECH, s.f., p. 9) dice que el rango está comprendido entre 6.5 y 8 la OMS (2009) dice que el rango se comprende entre 7,2 a 6,8, conceptualmente ambos hacen alusión a que cuando se supera este valor se requieren dosis altamente elevadas de cloro para lograr la efectividad de la cloración. El valor del pH incide directamente en los procesos de desinfección, a menor pH se favorece la producción de ácido hipocloroso, previamente explicado en el numeral 5.4, un desinfectante efectivo; se puede decir que el pH influye fuertemente en el grado de desinfección que se puede alcanzar con un cierto nivel de cloro (Ponce, 2005).

De acuerdo con el pH obtenido (Tabla 9), la alcalinidad se obtuvo por titulación con rojo de metilo. En cuanto al valor de alcalinidad, se obtiene que el agua de la fuente tiene una alta capacidad amortiguadora de ácidos, ya que es mayor a 75 mg CaCO₃/L (Red MAPSA, 2007) pero no alcanza a superar el máximo valor permisible establecido por la normativa colombiana para caracterizar una fuente aceptable. La alcalinidad del agua afecta a la desinfección con cloro, pues cuando las aguas tienen baja alcalinidad se vuelven muy sensibles a la contaminación debido a que no tienen capacidad para oponerse a modificaciones que generen una disminución del pH (Red MAPSA, 2007); en el otro sentido, la adición del cloro también afecta los valores de alcalinidad, cuando se aplica hipoclorito de sodio, como es el caso, dichos valores aumentan (Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía, 2008).

Con los valores de dureza obtenidos, se puede definir el agua como dura, al estar comprendida con valores entre 150 y 300 mg CaCO₃/L (Benítez Barahona, 2014, p. 2), esto quiere decir que el agua de la fuente tiene una concentración moderada de iones metálicos polivalentes, lo cual puede repercutir en la formación de

incrustaciones en las paredes de las tuberías. La dureza del agua puede influir indirectamente en el proceso de desinfección, dado que los precipitados pueden brindar refugio a microorganismos y protegerlos de los productos químicos usados en la desinfección (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, 1997). Al igual que la alcalinidad, aumenta con la aplicación de cloro en forma de hipoclorito (Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía, 2008).

Figura 11.
Resultados pruebas de coliformes



Nota. Resultados pruebas de coliformes realizadas por el método de filtración por membrana en Agar Chromocult. a) Primer resultado. b) Segundo resultado. c) Tercer resultado. 2020.

Finalmente se realizaron tres pruebas para coliformes totales mediante UFC con medio de cultivo m-Colibblue. Dichas pruebas indicaron que en el agua del pozo hay presencia de estos microorganismos potencialmente patógenos, aunque no hubo presencia de coliformes fecales (Figura 1, 2 y 3). De acuerdo con un estudio realizado por Perdomo C.H., Casanova O.N. y Ciganda V.S. (2001) en aguas subterráneas en el litoral sudoeste de Uruguay, se reveló una contaminación casi generalizada con coliformes totales en pozos de agua subterránea, esto representa que, aunque se reconoce que la concentración de estos microorganismos representa una deficiencia sanitaria en la calidad del agua, es normal que se encuentren presentes. En esa misma dirección, otro diagnóstico sobre la calidad sanitaria del agua de pozo en comunidades del Sur de Sonora, México realizado por Anduro Jordan, Cantú Soto, Campas Baypoli, López Cervantes, Sánchez Machado y Félix Fuentes (2017) obtuvo por resultado que el 50.9% de las muestras tomadas de pozos subterráneos presentaban contaminación por coliformes totales. Así mismo, información brindada por la Asociación de Agua Subterránea de British Columbia expresa que análisis realizados por el ministerio de Ambiente de Canadá

demonstraron que alrededor del 80% de las muestras analizadas contenían entre 1 y 10 CFU/100 mL de bacterias coliformes totales, aunque aclaraban que no había patrones geográficos que incidieran en la presencia de estos microorganismos. Igualmente, la junta estatal de control de recursos hídricos afirma, en su ficha de información sobre agua subterránea que generalmente las bacterias coliformes son altamente peligrosas y que se encuentran naturalmente en el ambiente, pero que, dado el caso de estar presentes, es importante identificar que no haya presencia de otros parámetros que sí son riesgosos para la salud humana, como la materia fecal, e identificar la fuente de contaminación para aplicar un proceso de desinfección efectivo. Lo que nos demuestran estos estudios es que, aunque en sí las coliformes totales puedan estar regularmente en agua subterránea, es imprescindible que se realice la adecuada desinfección de ésta para evitar riesgos y afectaciones a la comunidad en términos de salud pública.

Para establecer un punto de comparación de los efectos del proceso de potabilización realizado en la universidad, se analizó agua tratada tomada de un grifo del laboratorio de Ciencias Ambientales, de la cual se obtuvo que la alcalinidad y la dureza no tuvieron una variación significativa (Tabla 10), este proceso se realizó por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

Tabla 10.

Evaluación de los parámetros de alcalinidad y dureza en agua tratada

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO
Alcalinidad	mg CaCO ₃ / L	172
Dureza	mg CaCO ₃ / L	188,173

La forma en que el cloro se adiciona al agua afecta en alguna forma las probabilidades químicas de esta última. La adición de cloro gaseoso al agua bajará su alcalinidad debido a la producción de ácido fuerte y HOCl. Sin embargo, si el cloro es dosificado como sal de ácido hipocloroso, habrá un incremento en alcalinidad cuando reaccione con el H₂O. El uso de hipoclorito de calcio incrementa tanto la alcalinidad como la dureza total (Ca⁺²) del agua (social, 2006).

7.5 DEMANDA DE CLORO

La demanda de cloro es el resultado de una variedad de reacciones en las cuales el cloro se consume por causa de varios constituyentes del agua y por descomposición.

Si se adiciona una cantidad conocida de cualquiera de las formas de cloro y después de transcurrir un tiempo de contacto se analiza el agua clorada, se puede encontrar menos cloro presente que el adicionado. Entonces se dice que el agua tiene una “demanda de cloro” después de un cierto tiempo de contacto (social, 2006).

Es decir: $\text{Demanda de cloro} = \text{dosis de cloro} - \text{cloro residual}$

Figura 12.

Toma de muestras de agua sin tratar a la entrada de la PTAP en la UAO



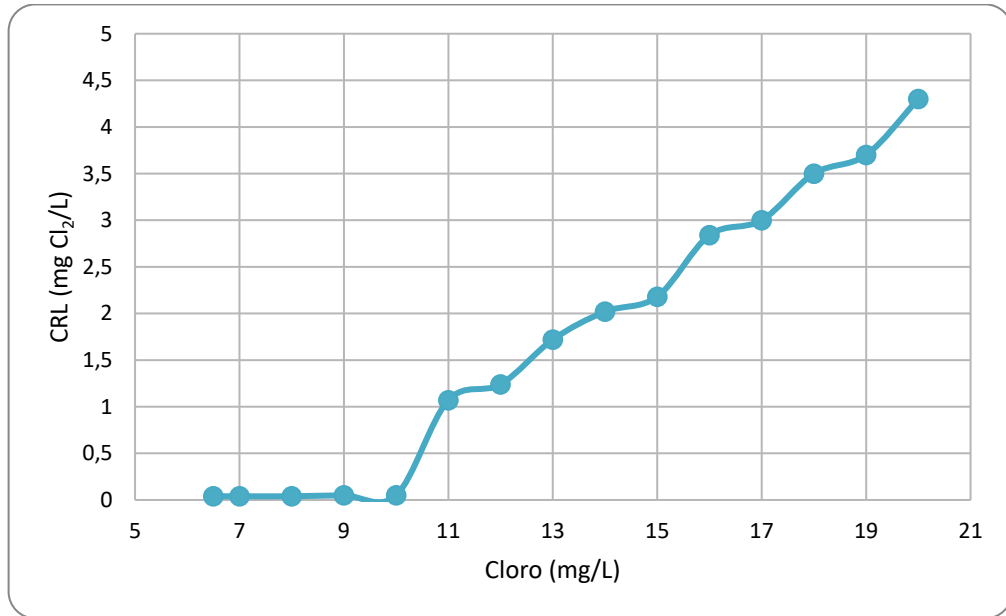
Se tomaron 10 muestras de 500 mL de agua cruda sin tratar en frascos con capacidad de 1L (Figura 9) y a cada uno se le añadió una dosis de desinfectante distinta para evaluar la dosis de desinfectante que, pasado el tiempo de contacto de este, asegure la concentración deseada de CRL. En este caso, el desinfectante utilizado fue hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) a una concentración del 5%. Pasado el tiempo de contacto se le midió a cada una de las botellas la concentración de cloro residual libre, los resultados obtenidos se observan en la tabla 11.

Tabla 11.
Demanda de Cloro inicial

Botella	Dosis $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (mg/L)	CRL (mg Cl_2/L)
1	6,5	0,04
2	7	0,04
3	8	0,04
4	9	0,05
5	10	0,05
6	11	1,07
7	12	1,24
8	13	1,72
9	14	2,02
10	15	2,18
11	16	2,84
12	17	3
13	18	3,5
14	19	3,7
15	20	4,3

El comportamiento del cloro en agua cruda que corresponde a los valores de la Tabla 11, se muestra en la ilustración 5. Se puede observar que hay un incremento del CRL proporcional a la dosis de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ añadida, indicando que esta sustancia está reaccionando con la materia orgánica presente para formar el residual de cloro. Al ser la fuente de abastecimiento, agua proveniente de pozo de buena calidad, el comportamiento del cloro tiende a ser lineal; este resultado se puede atribuir a que en el agua hay escasos niveles de amoníaco y aminas orgánicas, sustancias que generan el patrón de incremento conocido en la curva de demanda de cloro, de acuerdo con (Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía, 2008, pp. 12-13).

Figura 13.
Seguimiento de la demanda de cloro



Conforme a las guías para la calidad del agua potable de la OMS publicadas en 2011, se estableció como valor de referencia 5 mg/L para el cloro libre en el agua de consumo, el cual es un valor conservador, ya que en la Resolución 2115 de 2007 solo se establece el rango aceptable pero solo determina la importancia de superar el mínimo permisible de 0,3 ppm y adicionalmente en el estudio en el que se basó no se determinó una dosis sin efecto adverso, aunque se señala que es posible que algunas personas puedan percibir el olor y sabor del desinfectante. Basados en esta normativa, se decidió elegir las concentraciones de CRL correspondientes a 18, 19 y 20 mg Ca(ClO)₂/L (Tabla 12), equivalentes a valores de mgCl₂/L: 3.5, 3.7 y 4.3 respectivamente, como dosis óptimas para evaluar en el siguiente análisis su inocuidad en el agua de consumo.

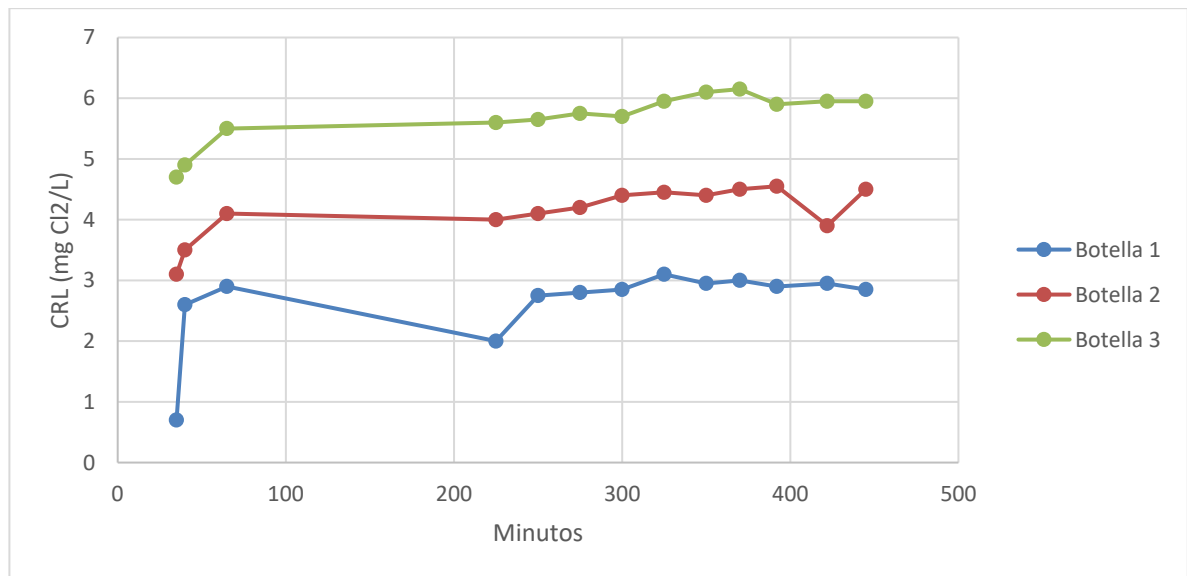
Tabla 12.
Dosis de Ca(ClO)₂ elegidas

BOTELLA	Dosis mgCa(ClO) ₂ /L	CRL (mg Cl ₂ /L)
1	18	3,5
2	19	3,7
3	20	4,3

Una vez determinadas las tres dosis óptimas, es decir 18 mgCa(ClO)₂/L para la botella 1; 19 mgCa(ClO)₂/L para la botella 2 y 20 mgCa(ClO)₂/L para la botella 3, se realizaron 3 ensayos de las dosis establecidas y se evaluó el comportamiento del cloro con respecto a la variación del tiempo de forma individual para cada botella. De los resultados obtenidos se escogió el ensayo más confiable que mostraba el comportamiento esperado, como se expresa en la Figura 14.

Figura 14.

Evaluación de la demanda de cloro con respecto al tiempo



La curva de demanda de cloro es medida por adición de cantidades conocidas de cloro al agua y midiendo la concentración de cloro residual después de un tiempo de contacto especificado (ver Anexo A). En este gráfico se observa el comportamiento esperado del cloro; se comienza con una fase en la que el cloro residual aún no es detectable, debido a que está reaccionando con agentes reductores presentes, después, hay un incremento inicial en el CRL al formarse los compuestos organoclorados y las cloraminas; seguido de una declinación al oxidarse estas últimas reduciendo así al cloro residual y luego, finalmente otro incremento a partir del cual la concentración de CRL tiene a estabilizarse; este último incremento se da a partir de lo que se conoce como punto de quiebre, cuando la dosis de cloro corresponde al mínimo de la curva. El remanente de cloro a partir de este punto es el que permanece en la red de distribución cumpliendo las garantías higiénicas (Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía, 2008, p. 12-13).

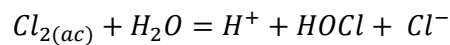
De la evaluación de la demanda de cloro con respecto al tiempo, se obtuvo que el punto de quiebre se obtiene a las 4 horas de reacción del desinfectante, a partir de

este tiempo la concentración de cloro se estabiliza en un valor promedio de 2.9 mgCl₂/L para la primera botella, 4.3 mgCl₂/L para la segunda botella y 5.9 mg Cl₂/L para la tercera botella. Dicho punto de quiebre corrobora los datos obtenidos en el numeral 9.2, en el cual se determinó que la dosis de Cl₂ empieza a disminuir a partir de la cuarta hora de dosificación.

Como se mencionó anteriormente, la resolución 2115 de 2007 estipula que el agua potable debe tener concentraciones de cloro residual dentro del rango de 0,3 mg/L a 2 mg/L en toda la red de distribución y durante toda la jornada. Con el fundamento anterior, se determinó que la dosis que se debería utilizar por parte de la Universidad como entidad responsable del suministro de agua potable a la comunidad educativa, corresponde a la dosis de 18 mg Ca(ClO)₂/L, equivalente a una concentración residual de 2.9 mgCl₂/L en la red de distribución. Si bien esta dosis excede el límite superior (2mg/L), estipulado en la Resolución 2115 de 2007, se ha encontrado evidencia bibliográfica que soporta que es favorable que haya un exceso, pues la concentración de CRL decae en la red de distribución por factores como tiempo, distancia y temperatura. Vale la pena aclarar que, en todos los casos, esta sugerencia debe estar sujeta a un estudio de factores de riesgo asociado a la formación de subproductos de desinfección.

7.6 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN LA PTAP DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

De la Tabla 9, se puede ver que el pH obtenido fue 7.41; de acuerdo con (social, 2006), a valores de pH menores de 7.5 predomina el ácido hipocloroso (HOCl), mientras que valores por encima de 7.5 es predominante la especie OCl^- . Es importante este resultado, ya que la habilidad desinfectante del HOCl es considerablemente mayor que la del OCl^- (de 80 a 100 veces más efectivo para *E. Coli* que el ion OCl^-). El Cl_2 (ac) no es importante por encima de un pH de 2, sin embargo, su análisis en laboratorio muestra cuánto se genera de HOCl, de acuerdo con el equilibrio que se presenta a continuación:



Con base en la información recolectada en la etapa de identificación de los aspectos operacionales, la solución para la desinfección se prepara con 600 g de hipoclorito de calcio al 70% en un recipiente de 500 L de capacidad. Esta solución es preparada 3 veces al día y se aplican por goteo permanente al tanque de almacenamiento. Por tanto:

$$\begin{aligned} & \frac{(600 \times 0.70)g(OCl)_2}{500 L H_2O} * \frac{1 mol Ca(OCl)_2}{142.98gCa(OCl)_2} * \frac{2molOCl^-}{1molCa(OCl)_2} * \frac{1molCl_2}{1molOCl^-} * \frac{71gCl_2}{1molCl_2} \\ & = 0.834 g/L Cl_2 = 834.24ppmCl_2 \end{aligned}$$

Así, la cantidad de cloro equivalente a la dosis aplicada en la solución de desinfección corresponde a 834.24 ppm Cl_2 . Partiendo de este dato y conociendo que cada franja horaria de operación de la PTAP corresponde a 5.33 h (16 ^{hdía}/3 Dosificaciones), se puede establecer que la cantidad de agua consumida en cada franja horaria es:

$$\frac{160m^3 H_2O}{16h} = 10m^3/h * 5.33h = 53.3m^3$$

Con lo anterior, se puede determinar la cantidad de Cl_2 empleado en la etapa de muestreo para ese consumo de agua:

$$\frac{834.24 \text{ mg/L Cl}_2 * 500L}{53300L} = 7.83 \text{ mgCl}_2/L$$

Con base en los datos calculados, se sugieren las siguientes alternativas para mejorar el proceso de desinfección en el sitio de estudio:

Tabla 13.

Formulación de alternativas de mejora para el proceso de desinfección en la PTAP de la Universidad Autónoma de Occidente

Aspecto	Descripción	Observación
Operación y mantenimiento	Dosificador	Para mejorar la disposición de la solución de desinfección hacia el tanque de almacenamiento, se sugiere contar con un sistema que permita mejorar el control de la dosificación; ya que la salida de esta solución se realiza por goteo constante a través de la manguera de ¼” (figura 4 y 5).
	Cambio de manguera ¼” del tanque de mezcla de la solución clorada (Figura 5)	Se sugiere incrementar el tamaño de la manguera de salida del tanque de dosificación, ya que la actual (1/4”) presenta taponamientos frecuentemente. Lo que indica que probablemente el caudal de salida del tanque requiere una manguera de mayor diámetro.
Desinfección	Incremento de la frecuencia de dosificación del hipoclorito de calcio	Con base en los datos analizados en el numeral 9.2, se sugiere que la frecuencia de dosificación del hipoclorito de calcio se realice cada 4 horas, correspondiente a la tendencia en la disminución del CRL para la Ilustración 6.

Tabla 13 (Continuación)

Aspecto	Descripción	Observación
Dosificación	Incremento de la concentración de dosis de hipoclorito de calcio	De acuerdo con lo expuesto con la Ilustración 6, la dosis recomendada de $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ es de 18 ppm, equivalente a 17,88 ppm Cl_2 . Por tanto, la dosis recomendada es superior a la dosis actual (7.83 mg Cl_2 /L). Lo anterior, con el fin de garantizar la dosis adecuada de ácido hipocloroso necesario para una correcta desinfección del agua de consumo.
	Bomba eléctrica	Se recomienda considerar a largo plazo un sistema de bomba dosificadora eléctrica que permita el suministro continuo de pequeñas dosis de solución clorada al tanque de almacenamiento de agua filtrada (Anexo B)
Personal	Socialización de propuestas de mejora con el personal encargado de la operación de la PTAP.	Como parte del proceso de mejora continua y la gestión adecuada de los procesos, y a que el proceso de cloración requiere cuidados y atención para una operación adecuada, se sugiere realizar capacitación al personal de operación de la PTAP, en cuanto a las propuestas establecidas para garantizar la correcta operatividad de esta.

8. CONCLUSIONES

Con base en los estudios de cloro residual libre, se pudo concluir que el sistema de desinfección en la PTAR de la UAO se comporta de forma congruente con las condiciones de la Universidad, en cuanto a la demanda de público diariamente. Evidencia de ello, se ilustra en el comportamiento del Cloro residual libre (CRL) para los días de mayor afluencia de estudiantes (miércoles) y para el de menor afluencia (viernes).

El diagnóstico de las condiciones operacionales en la PTAR de la UAO mostró que la infraestructura se encuentra en buenas condiciones y el sistema es apropiado para tratar adecuadamente el agua del pozo, como lo sugieren los resultados arrojados en las pruebas de calidad de agua. Sin embargo; se observó que es necesario mejorar la eficiencia del proceso, ya que se debe incrementar la frecuencia de aplicación y la concentración de la solución desinfectante para garantizar que el CRL se encuentre siempre en los niveles recomendados para la normatividad vigente.

A partir del monitoreo de CRL, se determinó la necesidad de incrementar el tiempo de dosificación de solución de hipoclorito de calcio, con el propósito de lograr compensar la disminución de CRL a partir de la cuarta hora de aplicación.

De acuerdo con las mediciones realizadas en la semana del 24 de febrero al 2 de marzo de 2020, se concluyó que es necesario implementar adecuaciones al proceso de desinfección en la PTAR de la UAO como las propuestas de la Tabla 13; de tal manera que dichos cambios, logren ajustar las demandas de cloro en el agua de consumo para los días de mayor afluencia de estudiantes dentro del campus.

9. RECOMENDACIONES

Dado que las mediciones de CRL se realizaron en la semana mencionada, se recomienda realizar nuevas mediciones para optimizar el proceso en condiciones postpandemia Covid19, ya que la demanda de cloro será diferente en condiciones de alternancia académica.

REFERENCIAS

- Agbar agua (s.f.). Ficha sobre calidad del agua. <https://es.scribd.com/doc/220657418/Ficha-Sobre-Calidad-Del-Agua-1>
- Anduro Jordan, J. A., Cantú Soto Ernesto Uriel, E. U., Campas Baypoli, O. N., López Cervantes, J., Sánchez Machado, D. I., y Félix Fuentes, A. (2017). Diagnóstico de la calidad sanitaria del agua de pozo en comunidades del sur de sonora, México. *Revista Salud Pública Y Nutrición*. <https://doi.org/10.29105/respyn16.1-1>
- Arpi Barrera, J.A.yYunga Guamán M.J.. (2017). *Evaluación de la calidad de agua de los sectores Corazón de María y Zhirincay de la Junta Administradora de agua potable Regional Bayas del Cantón Azogues*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27128/1/TESIS%20PDF..pdf>
- Asamblea General de las Naciones Unidas (Julio 28, 2010). Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento. https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S
- Asociación de Agua Subterránea de British Columbia (2007). *Water stewardship information series: Total, Fecal & E. coli Bacteria in Groundwater*. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/water-wells/coliform020715_fin2.pdf
- Barrenechea Martel, A. (s.f.). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, (capítulo 1). <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>
- Benítez Barahona, E.F. (2014). *Manual de procedimientos: Dureza Total. Método titulométrico, (1)*.
- Casero Rodríguez, D. (2008). Potabilización del agua, (*Módulo IV: Abastecimientos y Saneamientos Urbanos*). <https://docplayer.es/15807463-Potabilizacion-del-agua.html>

- Díaz Bautista, W. T. (2017). *Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tena en el departamento de Cundinamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14490>
- Giraldo Atehortúa, S. (2015). *Identificación de riesgos y puntos críticos de control en plantas de potabilización de agua*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://dokumen.tips/reader/f/identificacin-de-riesgos-y-puntos-crticos-de-control-2-identificacin-de-riesgos>
- Google. (s. f.). [Figura tomada de Google Maps para ubicar la Universidad Autónoma de Occidente]. <https://www.google.com/maps/place/Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Occidente/@3.353936,-76.5245147,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e30a1bce83eb4eb:0x374b9a9955d030e8!8m2!3d3.353936!4d-76.522326>.
- Guanuchi Quezada, C.M. y Ordoñez Jara, J.A. (2017). *Evaluación del cloro residual en la red de distribución de agua potable del Cantón Azogues a través de un modelo experimental*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28012>
- HACH Company (2014). *Método DPD: Cloro residual libre*, (método 8021). <https://www.hach.com/asset-get.download-en.jsa?code=55577>
- Hilleboe, H.E., (1995). *Manual de tratamiento de aguas: Glosario de términos más usuales*. Ed. Limusa, México. http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/GLOSARIO_TERMINOS.pdf
- Ibarguen Castañeda, M. y Bernal Mejía, L.M. (2008). *Establecer la Demanda de Cloro en el acueducto Tribunas Córcega de la ciudad de Pereira*. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1784/628166286132I?sequence=1>

Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos: División de calidad del agua, programa GAMA (2019). *Groundwater information sheet: Bacteria Indicators*.

https://www.waterboards.ca.gov/gama/docs/coc_bacteria_indicators.pdf

LENNTECH. (s.f.). *Desinfectantes*.

<https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-cloro.htm>

Leyton Flor, S. y Contreras Rengifo, R. (2015). *Aproximación a la Huella Hídrica en la Universidad Autónoma de Occidente*. Universidad Autónoma de Occidente.

<https://campussostenible.org/wp-content/uploads/2017/04/anexo-12-huella-hidrica-2015.pdf>

Ministerio de la Protección Social. (Mayo 9, 2007). Decreto 1575 de 2007. *Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. DO. 46623.

http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1775_2007.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social; Instituto Nacional de Salud; Sistema de Información para la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano. (Octubre, 2012). *Estado de la vigilancia de la calidad de agua para consumo humano en Colombia 2012*. ISSN: 2322-9497.

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/nforme%20Vigilancia%20Calidad%20Agua%20a%C3%B1o%202012%5B1%5D.pdf>

Ministerio de la Protección Social; Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Marzo 5, 2008). Resolución 0811 de 2008. *Por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución*. DO. 46935.

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=29337&dt=S>

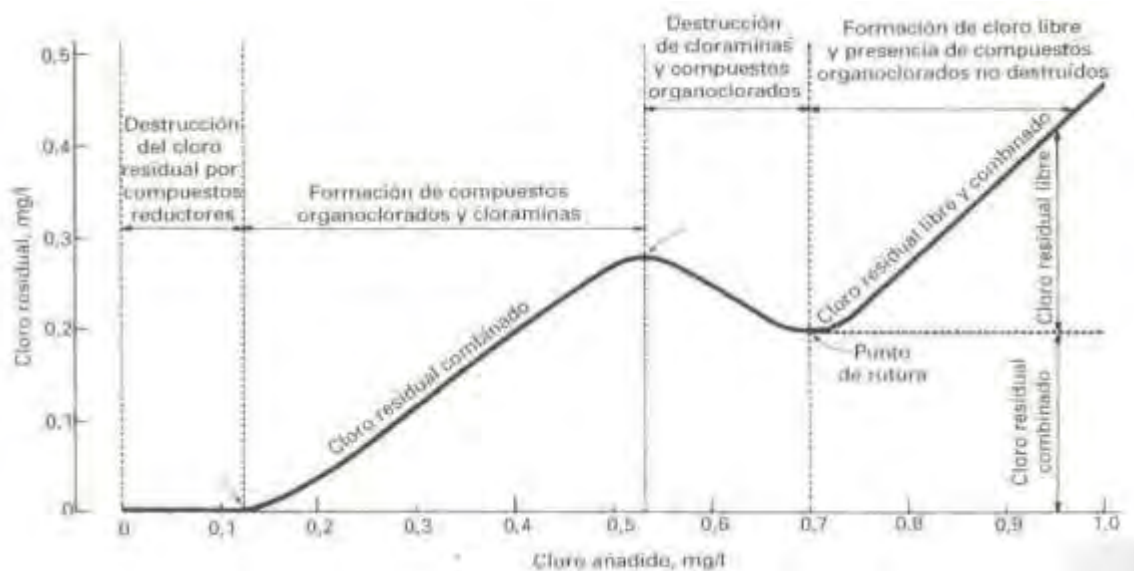
- Ministerio de la Protección Social; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial.(Junio 22, 2007). Resolución 2115 de 2007. *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.* DO. 46679
[.http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n del agua/Resoluci%C3%B3n 2115.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n%20del%20agua/Resoluci%C3%B3n%202115.pdf)
- Murillo Cuevas, Y.B. (2015). *Control estadístico de la calidad del agua respecto al cloro residual y turbidez en la planta de tratamiento seda Juliaca de 2015.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2378>
- Orellana, J.A. (2005). *Características del agua potable.*[Unidad Temática 3, ingeniería sanitaria]. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina.
[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria Sanitaria A4 Capitulo 03 Caracteristicas del Agua Potable.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_03_Caracteristicas_del_Agua_Potable.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías para la calidad del agua de consumo humano, Volumen 1: Recomendaciones, (3 ed).*
[https://www.who.int/water sanitation health/dwq/gdwq3 es full lowres .pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda.* Ginebra.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma y Huss, H.H. (1997). *Aseguramiento de la calidad de los productos pesqueros.* ISBN 92-5-303446-7.
<https://www.fao.org/3/t1768s/T1768S08.htm>
- Perdomo, C.H.; Casanova, O.N. y Ciganda, V.S. (Julio 26, 2001). Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el Litoridas Sudoeste del Uruguay. *AGROCIENCIA*, volumen 1, 10-22.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4239/1/AGROCIENCIA-UY-v.5.n.1.p.10-22-PERDOMO.pdf>

- Pérez Chanca, R.E.y Ramos Castellanos, G. (2018). *Dosis de cloro y cloro residual libre en el sistema de agua potable del sector de Puyhúan Grande del distrito y provincia de Huancavelica – 2018*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Perú. http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2181/TESIS_2018_1_NG.AMB._PEREZ%20CHANCA%20Y%20RAMOS%20CASTELLANOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Real Academia Española: Diccionario de la lengua española, (23.^a ed.), [versión 23.2 en línea]. <https://dej.rae.es/lema/potabilizaci%C3%B3n>
- SABA Plus y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. (2018). *Dosificador de cloro con bomba eléctrica: Manual de instalación, operación y mantenimiento*, <http://docplayer.es/150030492-Dosificador-de-cloro-con-bomba-electrica.html>
- Servicios de aguas de misiones S.A.- SAMSA (2008). *Proceso de potabilización del agua*. [http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n\(Sansa\).pdf](http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n(Sansa).pdf)
- Secretaria de Salud Pública Municipal de Santiago de Cali (2017). *Boletín Epidemiológico de eventos de interés en salud pública*. http://www.cali.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=descargar&idFile=35532&id_comunidad=salud
- Social, M. d. (2006). *Tratamiento y desinfección de agua para consumo humano por medio de cloro*. Guatemala: Organización Panamericana de la Salud.
- Stanton Block, S. (1991). *Desinfection, sterilization, and preservation* (5th edition). Philadelphia: Lea & Febiger.
- Universidad Autónoma de Occidente (2019). *UAO en cifras 2019-1*. <https://www.uao.edu.co/sites/default/files/UAO%20en%20cifras%202019-1.pdf>

Universidad Industrial de Santander (2018). *Programa de monitoreo de agua potable- BPM*, (primera versión).
https://www.uis.edu.co/intranet/calidad/documentos/bienestar_estudiantil/programas/PGBE.03.pdf

ANEXOS

Anexo A. Curva de demanda de cloro

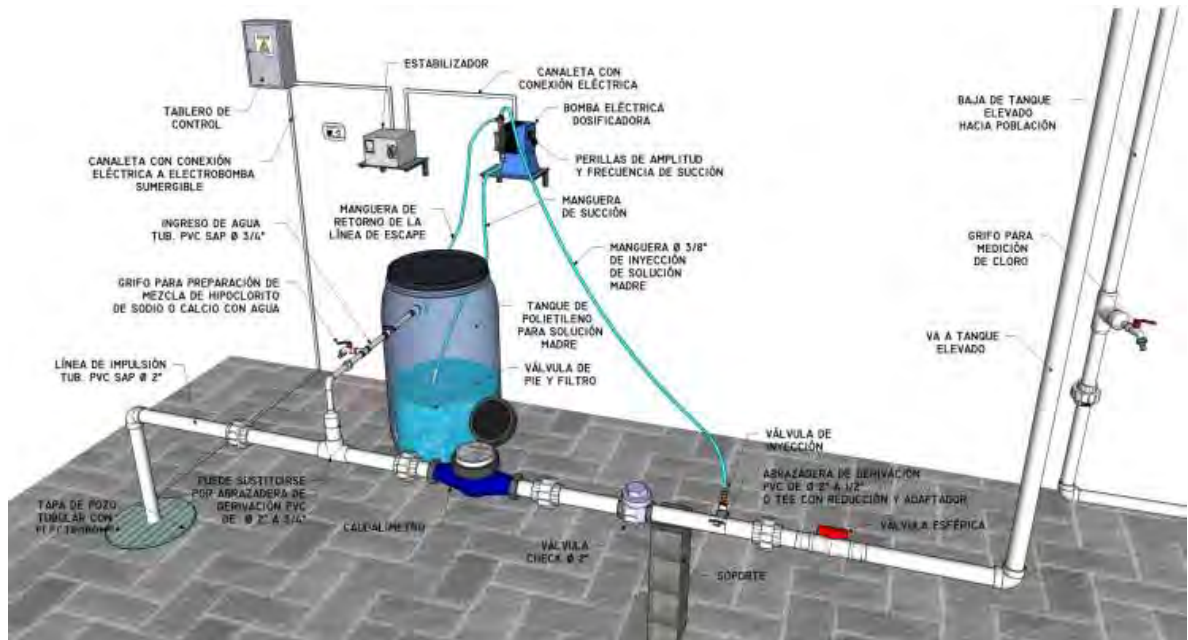


Anexo A. Curva de Demanda de Cloro. Tomado de: Acquatron (s.f.). https://www.acquatron.cl/pdf/desinfeccion_con_cloro.pdf. EN EL DOMINIO PÚBLICO.

La curva de demanda de cloro es medida por adición de cantidades conocidas de cloro al agua y midiendo la concentración de cloro residual después de un tiempo de contacto especificado. En la primera etapa de la curva de Demanda de Cloro, el cloro reacciona inicialmente con los agentes reductores presentes y no forma un residual detectable. La dosis de cloro al final de este tramo representa la cantidad de cloro requerida para satisfacer la demanda ejercida por los agentes reductores del agua. En el tramo posterior se forman los compuestos organoclorados y las cloraminas, es aquí donde empieza a formarse el residual de cloro libre. Después cuando se alcanza una concentración alta de cloro se oxidan las cloraminas, pero este proceso reduce el cloro residual y en cambio se forman otras sustancias. Posteriormente cuando la dosis de cloro corresponde al mínimo de la curva se alcanza el punto de quiebre, en el cual se ha consumido todo el cloro necesario para eliminar sustancias presentes, a partir de este punto cualquier adición posterior de cloro produce un incremento en el nivel de cloro residual libre y es ahí que se empiezan a cumplir las garantías higiénicas (Ibarguen Castañeda y Bernal Mejía (2008), pp. 12-13).

Anexo B Dosificador de cloro con bomba eléctrica

El sistema de dosificación de cloro con bomba eléctrica es un mecanismo que permite el suministro continuo de pequeñas dosis de solución clorada a la cantidad de agua tratada almacenada, altamente recomendado para sistemas de abastecimiento de agua potable con planta de tratamiento.



Anexo B. Partes del dosificador de cloro con bomba eléctrica. Tomado de: Dosificador de cloro con bomba eléctrica: Manual de instalación, operación y mantenimiento (2018). EN EL DOMINIO PÚBLICO.

Este sistema está compuesto principalmente por tres partes: una bomba eléctrica dosificadora, un tanque para la mezcla de la solución clorada y las conexiones de ingreso de agua como se puede ver en la ilustración. El primer componente es un equipo accionado por una bomba de diafragma o pistón que se encargaría de succionar la solución clorada del tanque e que la contiene y permitiría la regulación del caudal de dosificación de cloro en función de la demanda de cloro. El segundo componente es un tanque plástico de volumen de 500 L, como el que actualmente posee la PTAP, que se ubicaría junto a la bomba y permitiría contener la solución clorada. Finalmente, las conexiones serían el sistema de tuberías y accesorios que conectarían la línea de impulsión de la solución clorada.

Para la aplicación de este procedimiento se toma como referencia el proyecto SABA Plus aplicado en Perú por su eficiencia en el aprovisionamiento de cloro al agua para consumo humano durante la desinfección y protección del agua (2018). Se comienza estimando la cantidad de hipoclorito de calcio que se requiere para suplir la demanda de cloro diaria, para así lograr identificar el caudal de la solución clorada, dicha cantidad se obtiene de la siguiente manera:

$$P = \frac{V * C}{10 * \%Cl}$$

Donde “P” corresponde al peso del hipoclorito de calcio (g) para un día de prestación del servicio de agua potable, “V” al volumen (L) de agua suministrado en un día, C a la concentración aplicada (mg/L) y %Cl al porcentaje de cloro activo que contiene el desinfectante

Adicionalmente es necesario determinar la cantidad mínima de agua necesaria para la disolución del hipoclorito de calcio, la cual se obtiene de la siguiente forma:

$$Vmin = \frac{\%Cl * 10 * P}{Cmax}$$

Donde “Vmin” corresponde al volumen mínimo (L) de agua requerido, “%Cl” a la concentración de cloro activo del desinfectante, “P” al peso (g) obtenido en el paso anterior y “Cmax” a la concentración máxima (mg/L) de la solución clorada.

Finalmente, el caudal de dosificación de cloro a regular se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Qc = \frac{6 * Q * C}{Cm}$$

Donde “Qc” es el caudal de dosificación de la solución clorada, “Q” es el caudal de entrada al tanque de almacenamiento, “C” es la concentración aplicada y “Cm” es la concentración de la solución clorada.

El procedimiento que se debe seguir para preparar la solución clorada es el siguiente:

- Calcular el peso del hipoclorito de calcio utilizando la ecuación descrita y medir esta cantidad en un recipiente apto.
- Diluir la cantidad de hipoclorito de calcio medida en un balde lo suficientemente grande y mezclar para posteriormente dejar reaccionar por 30 minutos, a fin de que en este tiempo se sedimenten las partículas sólidas de cal.
- Añadir la mezcla anterior al tanque plástico, cuidando de no incorporar los residuos de cal. Completando el volumen de disolución requerido, asegurándose de que el volumen supere el volumen mínimo obtenido en la ecuación x.
- Tapar el tanque que ahora contendría la solución clorada para evitar que el cloro se volatilice.
- Preparada la solución madre poner en funcionamiento la bomba dosificadora con el fin de verificar o si es necesario regular el caudal de dosificación de la solución clorada.