

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Desinfección de agua de pozo para comunidades de la provincia de Santa Elena

INGE-2889

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

María Belén Brito Coox

Danilo Sergio Romanó Bustamante

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Declaración Expresa


Nosotros María Belén Brito Coox & Danilo Sergio Romanó Bustamante acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 Mayo del 2025.



María Belén Brito Coox



Danilo Sergio Romanó
Bustamante

Evaluadores

María Verónica

Ordoñez Pazmiño

Profesor de Materia

Lorena Jacqueline

Quinchuela Carrera

Tutor de proyecto

Resumen

Las comunidades de la provincia de Santa Elena al estar lejos de ciudades grandes suelen optar por fuentes de agua locales para satisfacer sus necesidades, como es el agua de pozo, sin embargo estas no cuentan con un tratamiento previo que asegure su potabilidad, por lo cual necesitan sistemas de desinfección adaptados a sus necesidades. Para esto se analiza las características propias de la zona, la cantidad de agua que se maneja y la demanda de Cloro necesaria para asegurar una desinfección adecuada, además se analizan las alternativas disponibles para la desinfección de la zona: Tabletas de Cloro e Hipoclorito de Sodio, para determinar su capacidad de llegar a niveles óptimos de Cloro residual y su factibilidad de aplicación. Siendo que las Tabletas demostró ser una opción mucho más accesible tanto en términos económicos como de aplicación, mientras que el Hipoclorito de Sodio, aunque más costoso, tiene una mayor facilidad de manejo y presenta menos riesgos para el uso en potabilización de agua

Palabras Clave: Desinfección, Reservorio, Tabletas de Cloro, Hipoclorito de Sodio

Abstract

The communities of Santa Elena, being far from big cities, often rely on local water sources to meet their needs, such as well water. However, these sources lack prior treatment to ensure potability, which makes it necessary to implement disinfection systems adapted to their specific conditions. For this purpose, the characteristics of the area, the volume of water managed, and the chlorine demand required to guarantee proper disinfection are analyzed. Additionally, disinfection agents available for the region: Chlorine Tablets and Sodium Hypochlorite, are evaluated to determine their ability to achieve optimal residual chlorine levels and their feasibility of application. The results show that Chlorine Tablets prove to be a much more accessible option in both economic and practical terms, while Sodium Hypochlorite, although more expensive, offers greater ease of handling and poses fewer risks for safe use in water potabilization.

Keywords: *Disinfection, Reservoir, Chlorine Tablets, Sodium Hypochlorite*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas	IV
Simbología.....	V
Índice de tabla.....	VI
Índice de gráfico	VII
Índice de figura.....	VIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	2
1.3 Justificación del Problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5 Marco Teórico	4
1.5.1 <i>Desinfección de agua</i>	4
1.5.2 <i>Mecanismo de reacción del cloro</i>	5
1.5.3 <i>Indicadores</i>	6
1.5.4 <i>Uso de pastillas de cloro</i>	6
1.5.5 <i>Medición de cloro</i>	9
1.5.6 <i>Electrólisis de salmuera</i>	10
Capítulo 2.....	11
2.1. Desinfección de agua.....	12

2.2.	Muestreo	12
2.3.	Concentración del hipoclorito de sodio con el tiempo	13
2.4.	Modelo experimental.....	15
2.4.1.	<i>Modelo Batch</i>	15
2.4.2.	<i>Modelo Semicontinuo</i>	16
2.5.	Prueba de demanda de cloro	17
Capítulo 3.....		19
3.1.	Caracterización de la zona.....	20
3.2.	Capacidad de producción de hipoclorito de sodio	21
3.3.	Análisis de tabletas de cloro	24
3.4.	Análisis Comparativo	27
3.5.	Diseño del sistema de inyección del hipoclorito de sodio.....	30
Capítulo 4.....		36
4.1.	Conclusiones.....	37
4.2.	Recomendaciones.....	38
Referencias.....		40
Apéndice A		44
Apéndice B.....		46
Apéndice C.....		49

Abreviaturas

Cy	$C_3N_3O_3$
DPD	N,N-Dietil-P-Fenilendiamina
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MAATE	Ecuador el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
mca.	Metros de columna de agua

Simbología

C	Carbono
<i>c</i>	Concentración
C_D	Cantidad de Cloro dosificado
C_R	Cantidad de Cloro residual
C_{RX}	Cantidad de cloro de reacción
Cl	Cloro
d	Diámetro
e^-	Electrón
<i>F</i>	Fuerza
g	Gramo
H	Hidrógeno
h	Hora
J	Joules
kg	Kilogramos
L	Litro
<i>M</i>	Masa
mg	Miligramo
mL	Mililitro
m_0	Masa inicial
m_f	Masa final
m^3	Metro cúbico
N	Nitrógeno
Na	Sodio
O	Oxígeno
<i>P</i>	Presión
pH	Potencial Hidrógeno
ppm	Partes por millón
psi	Libra por pulgada cuadrada
<i>q</i>	Caudal
seg	Segundo

t	Tiempo
t_R	Tiempo de residencia
μ	Velocidad cinemática
V	Volumen
W	Watt
v	Velocidad
v_D	Velocidad de desintegración
ρ	Densidad
$\%v/v$	Porcentaje volumen
$\$$	Dólar Estadounidense

Índice de tabla

Tabla 1.....	20
Tabla 2.....	21
Tabla 3.....	22
Tabla 4.....	24
Tabla 5.....	26
Tabla 6.....	31
Tabla 7.....	35

Índice de gráfico

Gráfico 1.....	12
Gráfico 2.....	23
Gráfico 3.....	25
Gráfico 4.....	26

Índice de figura

Figura 1.....	13
Figura 2.....	15
Figura 3.....	16
Figura 4.....	17
Figura 5.....	22
Figura 6.....	30

Capítulo 1

1.1 Introducción

El agua es una parte indispensable para la supervivencia de todos los seres vivos, incluyendo a los humanos; siendo necesaria no solo tanto para mantener a las personas hidratadas, sino como herramienta esencial en la preparación de comida y para mantener un nivel higiene y evitar diversas enfermedades y condiciones de salud a largo plazo (Howard, G., Bartram, J., Williams, A., Overbo, A., Fuente, A., Geere, J., 2020). Por lo tanto, se han establecido criterios y estándares para determinar que dicha agua no genere efectos dañinos en los seres humanos, siendo el agente regulador en el Ecuador el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), así como el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Sin embargo, muchos sectores y comunidades no cuentan con acceso a agua previamente tratada que cumpla con los estándares de calidad que aseguran su uso seguro, exponiéndose a diferentes peligros, entre los cuales está el contraer enfermedades e infecciones por la presencia de patógenos como la bacteria Salmonella o la Shigella, o de virus como el Enterovirus o la Hepatitis A (Varó Galvañ, & Segura Beneyto, 2009).

1.2 Descripción del Problema

Debido a encontrarse muy alejadas de las grandes ciudades, varias comunidades rurales de la provincia de Santa Elena no cuentan con acceso a agua potable, en su lugar varias comunidades de esta provincia formaron su propio sistema de distribución de agua en el cual mediante bombas extraen agua pozos, la almacenan en un reservorio y desde ahí la distribuyen a los diferentes miembros de las comunidades. La Junta Administrativa del Agua, el ente encargado de administrar y controlar el sistema reporta que la red abastece aproximadamente a 3 315 clientes. El sistema, desde su alimentación en cada uno de los pozos hasta su distribución a las casas de los habitantes es desinfectado agregando cloro

granulado en cantidades intuitivas, mas no posee un sistema de desinfección estandarizado que asegure que asegure su la potabilidad del agua, poniendo en riesgo la seguridad de quienes la consumen

Para mitigar estos riesgos la Junta agrega cloro granulado al reservorio, lo cual si bien es un agente desinfectante capaz de inactivar una gran variedad de patógenos (R. Destiani, M.R. Templeton., 2019), al no tener un control claro de la medida de Cloro que se debe agregar ni el tiempo entre dosificaciones se producen inconsistencias y fallas en el sistema, como ocasiones en las cuales clientes de la red han reportado momentos en los cuales el agua presenta un color y sabor desagradable, así como incidentes en los cuales la ropa ha quedado decolorada tras lavarla. Estos pueden llegar a ser un indicador de que el agua se encuentra sobre dosificada, ya que en Ecuador los parámetros de Cloro residual para agua potable son de entre 0.3 a 1.5 miligramos por litro (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2014), siendo que agua con una concentración mayor a esta puede causar la formación de productos terciarios carcinógenos que pongan en riesgo a todos los que consuman esta agua (Dunnick & Melnick, 1993)

1.3 Justificación del Problema

La presencia de patógenos en el agua es la principal causa de enfermedad asociada al agua de consumo. No solo tienen el potencial de causar graves brotes de infección capaces de afectar a una población entera, sino que su consumo prolongado de aguas contaminadas, aun con un bajo nivel, puede provocar enfermedades esporádicas difíciles de rastrear y vincular a la contaminación hídrica (World Health Organization, 2011)

El Cloro es el agente desinfectante más empleado debido a su facilidad de manejo así como su bajo costo tanto de implementación como de operación, sin embargo es importante

tener en cuenta que esta sustancia, así como sus derivados, es altamente corrosiva y dañina tanto para el medio ambiente como para las personas, por lo cual para implementarlo en un sistema de desinfección se requiere un método que tome en cuenta las características propias de la zona, de otro modo se corre el riesgo de una sobre o sub dosificación, lo cual volvería el tratamiento tanto ineficiente como peligroso (Rodríguez, 2014).

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Diseñar un sistema de desinfección de agua mediante cloración para la potabilización del agua de consumo en las comunidades de Santa Elena.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Construir un prototipo del tanque reservorio para el modelado de condiciones de flujo, altura del líquido y concentración del agente desinfectante tabletas de cloro
2. Determinar la capacidad de producción del equipo generador de Hipoclorito de Sodio, su consumo de sal y su tiempo de operación para la elaboración de una guía de uso del equipo.
3. Elaborar un análisis comparativo del sistema de desinfección empleando tabletas de cloro y del sistema empleando Hipoclorito de sodio, para la evaluación de ventajas y desventajas operativas, económicas, técnicas y ambientales.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 *Desinfección de agua*

La desinfección del agua es un tratamiento fundamental que asegura que el agua sea apta para el consumo humano, debido a que provee protección contra enfermedades

transmitidas por el agua, mediante la destrucción de los organismos patógenos de la misma. El propósito de la desinfección de agua es destruir los organismos patógenos, por consiguiente, previene enfermedades tales como tifoidea, colera, difteria y hepatitis (Pinto & Rohrig, 2003).

La cloración es mundialmente empleada como método de desinfección para desinfectar el agua potable, agua de piscinas, aguas residuales entre otras aplicaciones por su gran eficiencia en la destrucción de organismos patógenos, su bajo costo, fácil aplicación y sus propiedades residuales (Metcalf & Eddy, Inc et al., 2014).

1.5.2 Mecanismo de reacción del cloro

El cloro se encuentra disponible en un número de formas, principalmente: cloro gas (entregado como líquido en contenedores presurizados), cloro sólido o granulado en forma de cianuratos clorados (como dicloroisocianurato de sodio o ácido tricloroisocianúrico), hipoclorito de calcio, hipoclorito de litio e hipoclorito de sodio. Estos compuestos liberan cloro en formas de ácido hipocloroso (HOCl) e ion hipoclorito (OCl^-), que son los compuestos responsables de la acción de desinfección (Pinto & Rohrig, 2003). El cloro al entrar en contacto con los organismos patógenos desencadena una serie de mecanismos que comprometen su integridad y viabilidad. Se ha demostrado que daña la membrana de la pared celular, promueve filtraciones a través de la membrana celular y reduce los niveles de síntesis de ADN en las bacterias. También se ha demostrado que la inactivación por cloro es rápida y no requiere que las bacterias se estén reproduciendo activamente para ser eficaz (IUPAC, 2004).

Cuando se añade cloro al agua ocurren una serie de reacciones. En primera instancia, una porción del cloro reacciona con materiales inorgánicos, orgánicos y metales presentes, y no está disponible para la desinfección. La cantidad de cloro consumido en estas reacciones

es conocido como la demanda de cloro del agua y es la diferencia entre la cantidad de cloro añadido y la cantidad de cloro libre, combinado o cloro total remanente al final del periodo de contacto y es función de las características del agua, pH, temperatura del agua, cantidad de oxidante aplicado y tiempo de contacto (Davis, 2010). El cloro combinado actúa como desinfectante débil y no está disponible para la desinfección cuando se combina con compuestos nitrogenados formando cloraminas como mono cloraminas, di cloraminas y tricloraminas. El cloro libre es el cloro restante que sí se encuentra disponible para inactivar patógenos, y es el indicador de la potabilidad del agua (Mazhar et al., 2020).

1.5.3 Indicadores

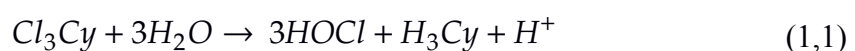
Dependiendo de la forma en que se aplique el cloro, el sistema presenta diferentes ventajas y obstáculos, siendo estos factores los que se toman en cuenta para definir qué sistema es más conveniente aplicar según las condiciones del sistema. Entre las más notables son los costos de adquisición, comparando cuanto tiempo de desinfección provee el agente desinfectante con su precio de venta; el riesgo de almacenamiento y operación, pues dependiendo las diferentes formas de cloro requieren diferentes requisitos para poder manipularse sin comprometer la seguridad tanto de las personas aplicándolo como al de los consumidores finales del agua; si las condiciones actuales del sistema son óptimas para aplicar el agente, y si no lo son, que modificaciones se le debe hacer, y finalmente que riesgos poseen en caso de una fuga o falla en el sistema, tanto para las personas como para el entorno del lugar.

1.5.4 Uso de pastillas de cloro

De acuerdo con lo señalado anteriormente, una de las formas desinfección de cloro es cloro sólido o granulado en forma de pastillas de cloro. El dicloro (dicloroisocianurato de

sodio anhidro o dicloroisocianurato de sodio di hidratado) y el tricloro (ácido tricloroisocianúrico) son químicos que proveen tanto ácido cianúrico como cloro libre al agua de un solo químico. Tanto el dicloro como el tricloro son fuentes de cloro en forma sólida o granular que requieren un manejo más simple que las formas de cloro de gas o líquida, poseen estabildades en el orden de años si son almacenados en un lugar fresco y sin humedad, no añaden calcio al agua cuando se disuelven y tienen un alto porcentaje de cloro con relación a su masa (Wahman, 2018). En el caso del ácido tricloroisocianúrico, este es un compuesto que presenta una riqueza del 90%, lo cual implica que tiene una alta concentración de cloro activo, no altera significativamente el pH del agua y es relativamente estable a la exposición e luz solar (González Luque, 2011).

Cuando el ácido tricloroisocianúrico se encuentra con agua, este se disuelve e hidroliza. Lo cual implica que la molécula de tricloro gradualmente se descompone en ácido hipocloroso (HOCl) y otros compuestos como el ácido cianúrico, bajo la acción de las moléculas de agua. Cy representa $C_3N_3O_3$, el tricloro expresa como Cl_3Cy y el ácido cianúrico como H_3Cy (Cervero & García, 2018; Xingfei Chemical, 2024).



Este proceso de reacción es relativamente lento y usualmente toma de varios minutos a varias horas en completarse.

La disolución de las pastillas de cloro en el agua está influenciada principalmente por procesos de advección, dispersión y difusión. Estos fenómenos determinan cómo el cloro contenido en la tableta se libera hacia el medio acuoso. Advección es el término usado para describir el movimiento de material disuelto o coloidal junto con la velocidad de la corriente del fluido y está asociado al transporte del cloro por el flujo del agua. La difusión molecular, por su parte es un mecanismo de transferencia de masa que ocurre incluso bajo condiciones

de flujo en reposo y bajo condiciones laminares o turbulentas, dado que no depende del movimiento global del fluido. En este proceso, las partículas disueltas o muy pequeñas se mueven de forma aleatoria, lo que se conoce como movimiento browniano. La dispersión es la transferencia de un constituyente desde una zona de mayor concentración a una de menor concentración, debido a variaciones en la velocidad de flujo. En el contexto de las pastillas de cloro, la dispersión facilita la mezcla más allá de la capa límite cercana a la pastilla (Metcalf & Eddy, Inc et al., 2014).

La ecuación de continuidad para conservación de masa se aplica al agua es:

$$\nabla \cdot (\rho q) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = M \quad (1,2)$$

Donde el primer término es la divergencia del flujo de masa, el segundo término representa el cambio en la densidad del fluido con respecto al tiempo y el tercero representa la generación y/o destrucción de masa dentro del sistema (Martin et al., 2020).

La ecuación de conservación de momentum, o Navier-Stokes es:

$$F - \nabla P + \mu \nabla^2 v = \rho (\nabla \cdot v) v + \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1,3)$$

Donde F es fuerza de cuerpo, P es la presión del fluido, v es el vector de velocidad del fluido, μ es la viscosidad cinemática, y ρ es la densidad del fluido.

La ecuación general para disolver masa en un fluido se usa para modelar la masa de cloro moviéndose a través del sistema.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (qc - D\nabla c) - R = 0 \quad (1,4)$$

Donde el primer término representa la tasa de cambio de masa almacenada, el segundo término representa la divergencia de flujo másico donde qc es advección y $D\nabla c$ es dispersión, y el tercer término representa la fuente (Martin et al., 2020).

En conjunto, estos mecanismos determinan la cantidad y velocidad con la que se libera el cloro libre residual en la solución, lo cual es fundamental para garantizar una desinfección efectiva y controlada.

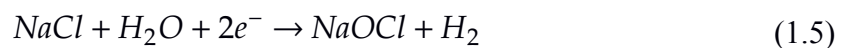
1.5.5 Medición de cloro

En Ecuador, la normativa NTE INEN 1108:2020 establece que el agua potable destinada a consumo humano debe contener un nivel de cloro libre de 0.3 a 1.5 ppm luego de un tiempo mínimo de contacto de 30 minutos (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2014). El agua potable tratada puede encontrarse expuesta a posibles poluciones en la red de distribución, desde el punto de tratamiento hasta el punto de consumo. La presencia de cloro libre produce un efecto residual activo, lo que significa que sigue actuando una vez aplicado en la red de distribución de agua, garantizando así la inocuidad del agua (Vargas et al., 2021).

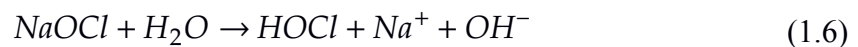
La cantidad de cloro libre se puede medir empleando varios métodos, entre estos el más preciso y el más empleado es el colorimétrico. En el cual se produce un cambio de color asociado con la reacción del cloro libre en sus dos formas de ácido hipocloroso e ion hipoclorito, con el indicador N,N-dietil-p-fenilendiamina (DPD). El análisis espectrofotométrico se basa la cuantificación de la cantidad de luz absorbida por una solución coloreada, en donde la intensidad de color es equivalente a la cantidad de sustancia en la muestra, es decir que es proporcional a la concentración de cloro presente (Abril et al., 2000). La espectrofotometría UV-visible se basa en la ley de absorción, conocida como la ley de Beer-Lambert, la cual establece que la absorbancia de una sustancia depende directamente tanto de su concentración como del grosor del medio atravesado por la luz. Es decir, a mayor concentración o espesor, mayor será la cantidad de luz absorbida (Dadi & Yasir, 2022).

1.5.6 *Electrólisis de salmuera*

El hipoclorito de sodio es un compuesto que se utiliza eficazmente para desinfectar el agua. Además, se emplea a gran escala como detergente y desinfectante de superficies, blanqueador, desodorizante y desinfectante de agua. Se inicia con una solución de NaCl disuelta hasta alcanzar una salmuera concentrada. Esta solución se somete a electrólisis en una celda sin separación, lo que genera una solución alcalina de NaOCl y, simultáneamente, se produce gas hidrógeno (Ronco & Mishkin, 2007):



El hipoclorito de sodio, disuelto en el agua, también hidroliza al estar en contacto con el agua.



La cantidad de producto que se forma durante el proceso de electrólisis depende las condiciones operacionales de la celda, que son la masa equivalente de la sustancia que forma el electrolito y la cantidad de corriente eléctrica o carga que circula a través de la celda electrolítica

Capítulo 2

1.

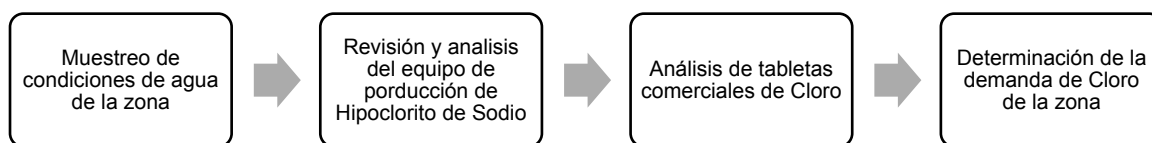
2.

2.1. Desinfección de agua

La desinfección de agua de pozo para las comunidades de Santa Elena tiene dos posibles agentes desinfectantes de acuerdo con su accesibilidad y a su amplia utilización para desinfectar agua en comunidades rurales. Ambas opciones son evaluadas de acuerdo con su capacidad de mantener el agua en parámetros óptimos para su consumo según la normativa legal (0.3 – 1.5 ppm), su facilidad para llegar y mantener estos niveles, el costo de aplicación y sus posibles consecuencias ambientales en caso de accidentes. Estas opciones son el uso de tabletas comerciales de Cloro e Hipoclorito de Sodio producido localmente por los miembros de la comunidad. Para esto se emplea la siguiente metodología:

Gráfico 1.

Diagrama de bloques de la metodología



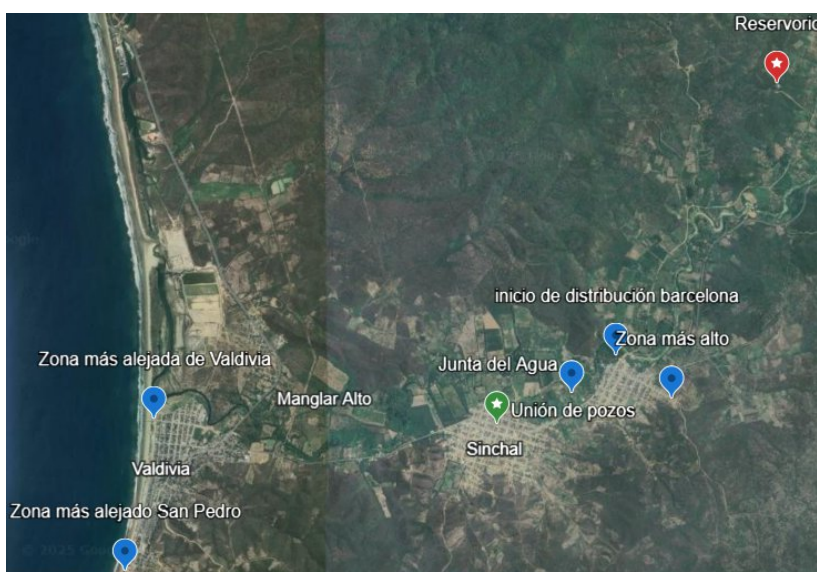
Nota. El diagrama indica los pasos más importantes que se tomaron en consideración

2.2. Muestreo

Para comprobar si es necesario implementar un diseño de un sistema de dosificación de cloro en el agua de pozo, la cual es bombeada hacia un reservorio para después ser distribuida a las comunidades de Barcelona, Sinchal, Valdivia y San Pedro, se tuvo que realizar un muestreo del parámetro cloro libre residual en la red de distribución de agua potable que pasa a través de las comunidades. Debido a que no es viable una recolección completa del tamaño de la muestra estadísticamente por su extensión y al contar con recursos limitados de reactivos DPD, entonces fue más factible realizar un muestreo en puntos límites que se estableció que son relevantes conocer. Estos puntos de muestreo límites incluyen el reservorio de agua, la zona más cercana al reservorio que recibe agua potable, el punto más alto de la red de distribución de agua que se encuentra en la comunidad de Barcelona, el punto de unión de pozos, la toma en La Junta del Agua y el punto más alejado que recibe agua de la red en la comunidad de Valdivia, así como en San Pedro, obteniendo 7 puntos de muestreo relevantes y con un total de 21 mediciones, tres por cada punto mencionado.

Figura 1.

Puntos notables de medición.



Nota. El siguiente mapa fue obtenido mediante la herramienta Google Earth.

2.3. Concentración del hipoclorito de sodio con el tiempo

Se analizó la concentración de Hipoclorito de Sodio que produce el equipo de electrolisis disponible en la Junta Administrativa del Agua. Se tomó alícuotas de la producción de Hipoclorito de Sodio en intervalos de tiempo de 15 minutos la primera hora de operación y posteriormente de 1 hora. Con estas muestras se analiza la concentración a la que llega el equipo en estos intervalos de tiempo.

Se empleó un método colorimétrico para analizar la concentración de las alícuotas, debido a que las instalaciones de la Junta del Agua no están adaptadas para realizar un análisis in situ con métodos más exactos como puede ser la titulación yodométrica, y que almacenar y transportar las alícuotas a un laboratorio equipado no es recomendable debido a la inestabilidad de las muestras, pues la vida útil de NaOCl es limitada y se puede ver mermada por muchos factores, lo cual es debido a que el HOCl puede reaccionar con una amplia variedad de moléculas orgánicas o metales que pueden estar presentes en la solución como contaminantes.

La colorimetría se basa en la medición de la intensidad del color y en su relación con la presencia de determinados elementos, en este caso el N,N-dietil-p-fenilendiamina o DPD, el cual adquiere un color rosado en presencia de Cloro. Este método mide la concentración de Cloro libre, por lo cual se realiza un aproximado empleando su relación estequimétrica:

$$\begin{aligned}C_{NaOCl} &= C_{Cl_2} * \frac{M_{NaOCl}}{M_{Cl_2}} \\C_{NaOCl} &= C_{Cl_2} * \frac{74.4}{70.9} \\C_{NaOCl} &= 1.05 * C_{Cl_2} \tag{2,1}\end{aligned}$$

En donde C_{NaOCl} y C_{Cl_2} representa la concentración de Hipoclorito de Sodio y Cloro libre respectivamente, y M_{NaOCl} y M_{Cl_2} su peso molecular

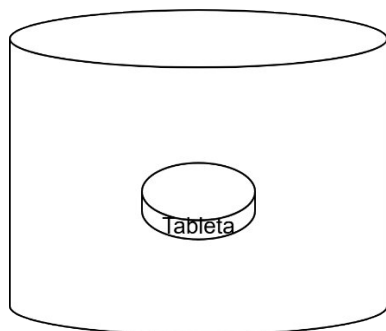
2.4. Modelo experimental

2.4.1. Modelo Batch

Para medir la tasa de desintegración de la tableta comercial de Cloro se emplea un modelo batch, en el cual se agregó una dosis fija de 1 tableta comercial de cloro en un volumen de control constante de agua destilada de 6 Litros. Se mide la concentración de Cloro residual en el agua en intervalos fijos de 15 minutos las primeras 5 horas, posteriormente se realizó mediciones cada hora debido a limitaciones de tiempo. Se empleó un equipo de medición de colorimetría, midiendo la reacción del Cloro libre con DPD, así como la masa perdida por la tableta.

Figura 2.

Diagrama de Modelo Batch



La velocidad de desintegración se obtuvo con al comparar la masa perdida por la tableta en el tiempo en el que se la dejó reposar en el volumen de control.

$$v_D = \frac{m_0 - m_f}{t} \quad (2,2)$$

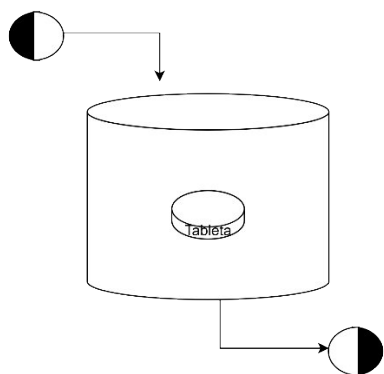
En el cual V es la velocidad de desintegración, m_0 es la masa inicial de la tableta, m_f es la masa final de la tableta y t es el tiempo total que se mantuvo en el volumen de control.

2.4.2. Modelo Semicontinuo

Para imitar las condiciones del reservorio, se empleó un sistema semicontinuo con 1 entrada y 1 salida de agua destilada, en el cual se agregó una dosis fija de la tableta de Cloro. Este modelo imita el tiempo de residencia que posee el tiempo de residencia del reservorio, y representa en condiciones análogas la salida y entrada en caudales acordes al volumen del sistema.

Figura 3.

Diagrama de Modelo Semicontinuo



El tiempo de residencia hace referencia al tiempo que el agua permanece en el sistema desde que entra hasta que sale y es completamente reemplazada por una alimentación fresca.

$$t_R = \frac{V}{q} \quad (2,3)$$

En el cual t_R significa tiempo de residencia, V volumen total del sistema y q el caudal de entrada y salida.

Se calculó el volumen promedio del reservorio con la altura promedio de agua en el reservorio es 1.32 metros y su diámetro es 25.6 metros, obteniendo 679068.17

litros. Se aproximó la descarga del reservorio mediante el diámetro de la tubería de salida y la presión de descarga.

$$q = A * v$$
$$q = \frac{\pi d^2}{4} * \sqrt{\frac{2 P}{\rho}} \quad (2,4)$$

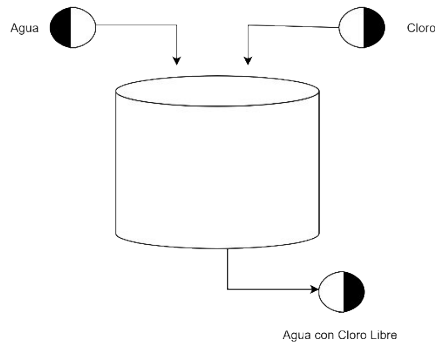
Sabiendo que la tubería de salida es de 5 pulgadas y la presión de salida necesaria para suministrar agua a todos los miembros de la comunidad es aproximadamente 50 libras, se obtuvo un caudal de salida de 332.63 L/s. Siguiendo la fórmula 2,3 se obtuvo un tiempo de residencia de 34 minutos. Con este dato se ajustó la salida del sistema semicontinuo con volumen de 56.78 L a un caudal de 0.028 L/s con la ecuación 2,3

2.5. Prueba de demanda de cloro

En un volumen de control de 2 litros de agua sin tratar propia de la localidad planteada, se administra el agente desinfectante de Hipoclorito de Sodio en una concentración conocida, luego se procedió a examinar la concentración de Cloro residual de la muestra tras 30 minutos de aplicación. Este proceso se repitió con varias concentraciones y se determinó la cantidad de Cloro que reacciono y que concentración de aplicación llegó a niveles de Cloro residual dentro de la normativa legal (0.3 – 1.5 ppm)

Figura 4.

Diagrama de Modelo para análisis de desinfección.



Mediante un balance de masa se determinó la dosificación de Cloro necesaria para neutralizar los patógenos presentes y lograr llegar a niveles de cloro libre recomendados

$$C_{RX} = C_D - C_R \quad (2,5)$$

En donde C_{RX} equivale a la cantidad de Cloro que reacciona y neutraliza los patógenos, C_D la cantidad de Cloro dosificado y C_R el Cloro Residual medido al final.

Capítulo 3

- 1.
- 2.
- 3.

3.1. Caracterización de la zona

Se realizó un muestreo en tres ocasiones distintas empleando un colorímetro de campo. En la primera medición no se encontraron niveles de cloro detectables. Se indicó que por motivos de limpieza el reservorio había sido vaciado recientemente y que la dosificación de tabletas de Cloro se la había realizado pocas horas antes de la toma de muestra por lo cual se asumió que el sistema no tuvo tiempo de alcanzar niveles de Cloro libre estables.

En las siguientes dos ocasiones se aseguró con anterioridad que la dosificación de tabletas de Cloro se realizó de manera previa: en la segunda ocasión se dosificó con 1 semana de antelación a la medición y la tercera se realizó con 2 semanas de antelación. En ambas ocasiones se obtuvieron resultados similares a la primera medición, en donde no se detectó niveles de Cloro residual. Basados en esto se determinó que la dosis de agente desinfectante (cantidad de tabletas de Cloro), que en la segunda ocasión fueron 3 tabletas y en la tercera 5 tabletas, no satisface la demanda de Cloro del sistema y por lo tanto corre el riesgo de que el agua que se suministra se encuentre infectada con patógenos.

Tabla 1.

Datos de medición de Cloro Libre Residual

Tiempo de aplicación	Promedio de concentración de Cloro (ppm)
----------------------	--

1ra Medición	1 día	0
2da Medición	1 semana	0
3ra Medición	2 semanas	0

Se procedió a obtener agua del pozo, previa a que entrara al reservorio y corriera el riesgo de entrar en contacto con rastros de Cloro dentro de este. A esta se le administró Hipoclorito comercial, el cual medido previamente se determinó que posee una concentración de 46173.24 ppm, o 4.62%. A este hipoclorito se lo diluye repetidamente y se lo administró a volúmenes de control de 2 litros. Tras 30 minutos de su aplicación se midió la concentración de Cloro libre residual y se determinó que para llegar a parámetros óptimos de Cloro residual (0.3 – 1.5 ppm) se debe administrar un aproximado de 2.44 – 3.64 ppm.

Tabla 2.

Prueba de jarras de dosificación de Cloro.

Cantidad de cloro aplicado (mg)	Concentración esperada (ppm)	Concentración medida (ppm)	Cloro Perdido (ppm)
13.85	13.85	11.61	2.24
18.47	9.23	7.10	2.13
69.26	34.63	32.47	2.16
92.35	46.17	44.12	2.05
115.43	57.72	55.61	2.11
138.52	69.26	67.13	2.13

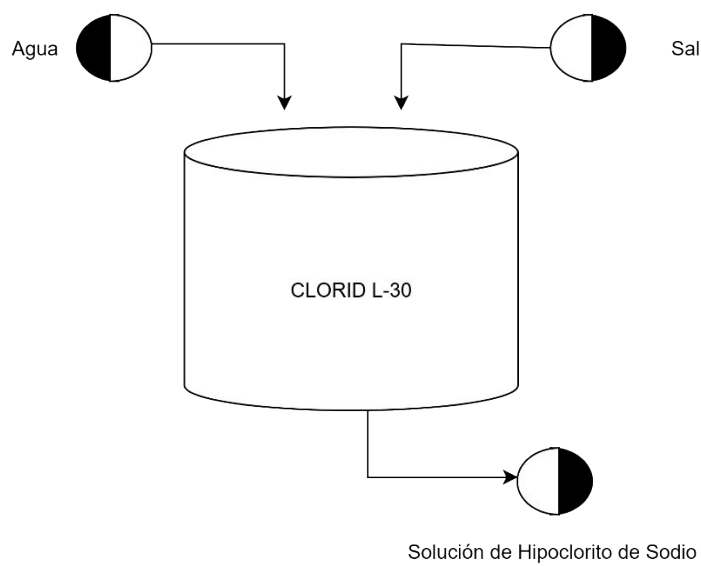
3.2.Capacidad de producción de hipoclorito de sodio

El equipo de producción de Hipoclorito de Sodio con el que cuenta La Junta Receptora del Agua son dos Clorid L-30, de los cuales actualmente solo 1 se encuentra en funcionamiento. El equipo tiene un tiempo de operación de 12 horas, con una alimentación de agua y sal no yodada y una salida de solución de Hipoclorito de Sodio. Ambas alimentaciones se realizan de manera empírica, de modo que se buscó que la

cantidad de agua empleada sea suficiente para cubrir por completo los electrodos del sistema, y la sal suministrada equivalga a "tarrina y media" del recipiente de medición que tienen en la instalación. Tras su medición se determinó que aproximadamente se suministra 37.85 litros de agua y 1020.6 gramos de sal.

Figura 5.

Diagrama de equipo de producción de Hipoclorito de Sodio



Empleando las mismas condiciones de operación que maneja la Junta, se realizaron tres corridas diferentes y se analizaron las primeras 6 horas de operación del sistema, obteniendo un perfil de producción de Hipoclorito de Sodio a lo largo del tiempo

Tabla 3.

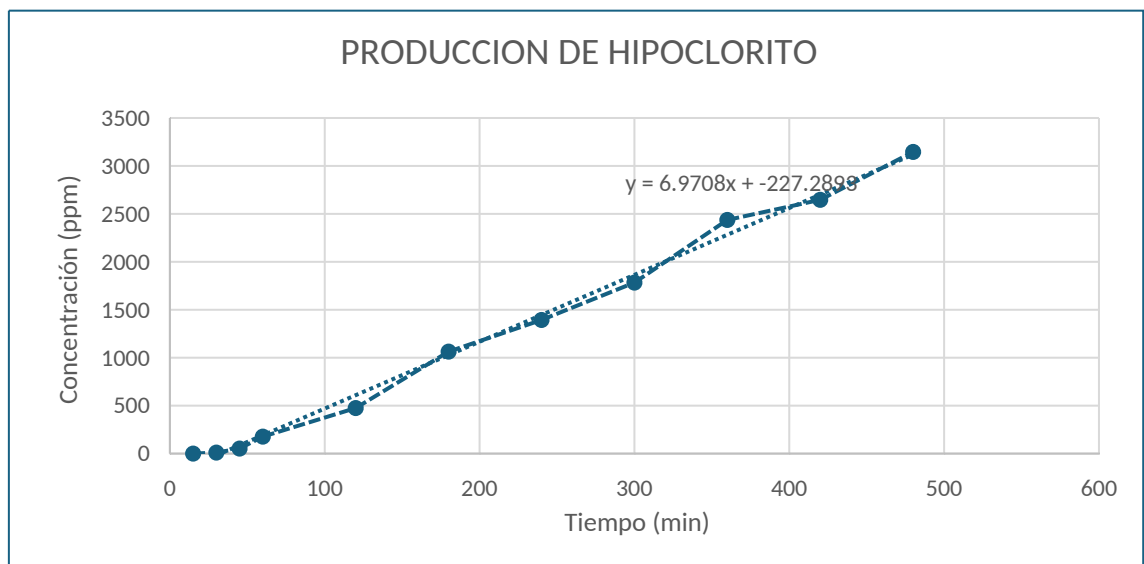
Concentración de Hipoclorito de Sodio por el equipo CLORID L-30

Tiempo (min)	Concentración (ppm)	Concentración (%v/v)
15	10.45	0.00
30	52.45	0.01
45	176.95	0.02
60	474.95	0.05
120	1063.45	0.11

180	1393.55	0.14
240	1783.15	0.18
300	2436.75	0.24
360	2646.55	0.26
420	3145.95	0.31

Gráfico 2.

Concentración de la producción de Hipoclorito de Sodio a lo largo del tiempo de operación.



$$C = 6.9708t - 227.29 \quad (3.1)$$

Se aprecia un crecimiento casi lineal en la concentración de Hipoclorito, de modo que a mayor tiempo se deje operando el equipo mayor concentración de Hipoclorito se obtiene. Usando este sistema, se proyectó la concentración esperada tanto para las 12 horas que el equipo es normalmente operado, como para las 24 horas de operación en las cuales el equipo es capaz de trabajar según sus especificaciones. Para un tiempo de operación de 12 horas se estimó que la concentración de Hipoclorito que se obtiene es de 4791.7 ppm, o lo que equivale a 0.48% en porcentaje volumen; mientras que para un tiempo de operación de 24 horas se obtiene 9810.7 ppm p 0.98%.

Estos valores, si bien están sujetos a errores por de las estimaciones realizadas, indica que el equipo esta operando a capacidades inferiores a su máxima capacidad, pues su producción máxima es de 12500 ppm (Clorid S.A., 2020). Se considera que una razón para la baja en la capacidad del equipo se debe al agua que se emplea como alimentación, la cual procede del reservorio el cual, como ya se dijo anteriormente, no se encuentra tratado adecuadamente, por lo cual se corre el riesgo de la presencia de elementos que entorpezcan la conversión.

3.

3.1.

3.2.

3.3. Análisis de tabletas de cloro

Las tabletas de Cloro empleadas provienen de un distribuidor comercial, el cual no cuenta con las propiedades exactas de las mismas, por ese motivo se empleó un sistema tanto batch como semicontinuo para determinar la velocidad de disolución de las tabletas, así como de la cantidad de Cloro que estas liberan.

Tabla 4.

Velocidad de desintegración de las tabletas de Cloro en diferentes condiciones

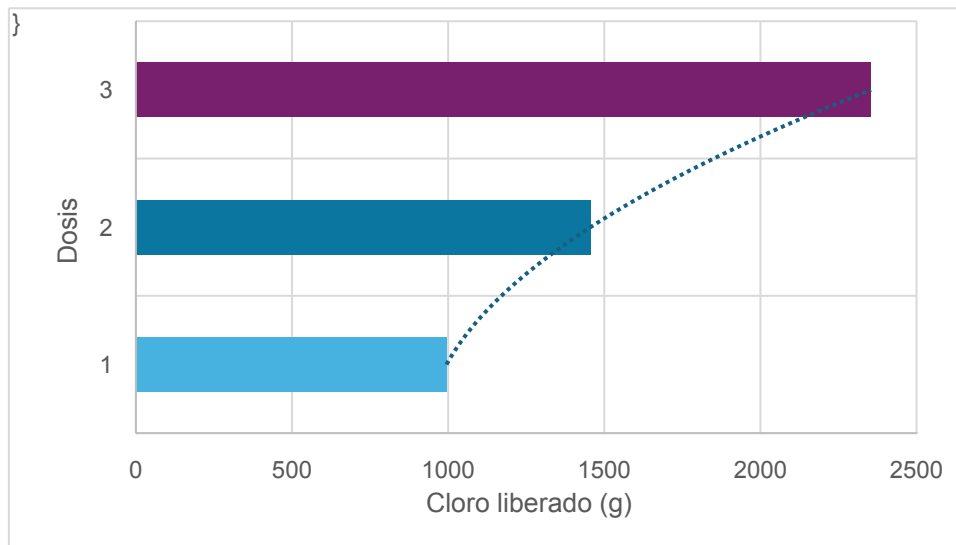
	Velocidad de Desintegración (g/min)
Estacionario	0.002
Semicontinuo	0.087
Semicontinuo doble dosis	0.081
Semicontinuo triple dosis	0.092

Un punto notable es como la velocidad de desintegración no presentó variaciones significativas en cuanto al número de tabletas suministrado, pues el escenario semicontinuo (1 tableta), semicontinuo doble dosis (2 tabletas) y semicontinuo triple dosis (3 tabletas) la velocidad es muy similar, indicando que la cantidad de tabletas no es un factor determinante en la velocidad de desintegración. Sin embargo, se presencié una diferencia considerable en la velocidad de desintegración entre el sistema aislado y el sistema con movimiento, siendo que en este último las tabletas se desintegran a un ritmo mucho mayor. Esto presenta un problema, pues el reservorio no es un sistema estrictamente continuo ni aislado, pues tanto las alimentaciones como la salida se abren y cierran a discreción de la Junta del Agua para mantener un nivel óptimo en el reservorio. Se observó que las tabletas que suministran al reservorio tienen una duración aproximada de entre 2 a 3 semanas, lo cual equivale a una velocidad de desintegración de entre 0.006 – 0.009 g/min, lo cual se encuentra en un intermedio a los valores de las condiciones estacionarias y semicontinuas.

Un factor en el cual sí afectó la dosificación fue en el nivel de Cloro que se libera en el sistema, pues se evidenció como el aumento de la dosificación incrementó de manera significativa la concentración de Cloro libre en el sistema. En base a este aumento se estimó el incremento de Cloro liberado por dosificación en un sistema semicontinuo en relación con la cantidad de tabletas de Cloro presentes en este.

Gráfico 3.

Relación de Cloro liberado por la cantidad de tabletas de Cloro administradas en el sistema



$$Dosis = 218.72M_{Cl}^2 - 195.08M_{Cl} + 971.08 \quad (3,2)$$

Para este análisis es importante tener en cuenta que se realizó con la suposición que el sistema no se llega a saturar de Cloro, pues se encuentra en un estado semicontinuo de constante salida.

Tabla 5.

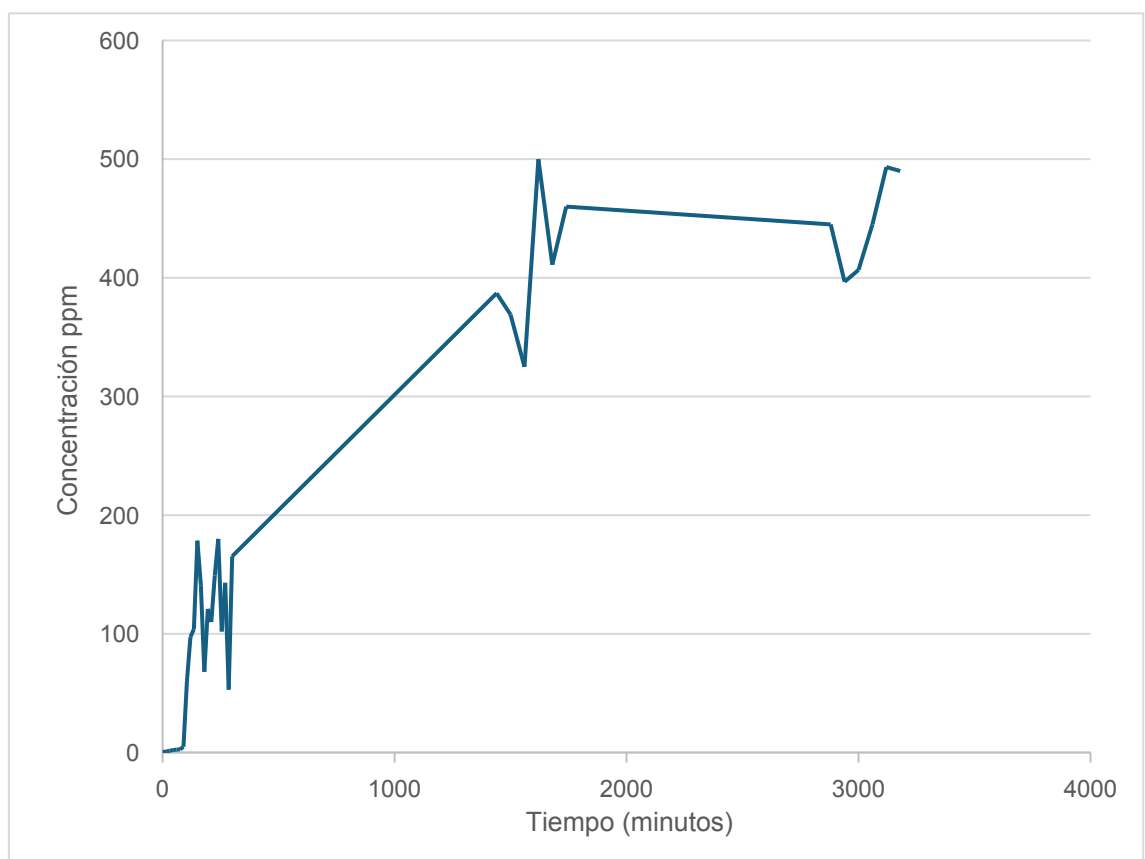
Concentración de Cloro Libre en diferentes dosificaciones de tabletas de Cloro.

Tiempo (min)	Concentración dosis 1 (ppm)	Concentración dosis 2 (ppm)	Concentración dosis 3 (ppm)
0.000	0.000	0.000	0.000
30.000	7.843	16.806	19.701
60.000	12.175	22.596	30.041
120.000	15.889	25.278	38.317
180.000	17.022	25.596	40.597
240.000	17.367	25.634	41.225
300.000	17.473	25.639	41.398
360.000	17.505	25.639	41.446
420.000	17.515	25.639	41.459
480.000	17.518	25.639	41.462
540.000	17.518	25.639	41.463
600.000	17.519	25.639	41.464

Se evidenció además que, en el sistema estacionario, el cual se mantuvo por un periodo más prolongado de tiempo, la concentración de Cloro Residual se vio mucho más aumentada, suponiendo que esto se debe al estancamiento y a la sobresaturación del sistema, de modo que el agua iba perdiendo sus características propias y adquiría las del Cloro (olor y color), al punto que se detuvo el ensayo con este modelo pues se observó que el volumen se comenzaba a volatilizarse.

Gráfico 4.

Comportamiento del Sistema Batch.



3.4. Análisis Comparativo

Tras determinar los niveles de Cloro necesario a administrar se analizó la facilidad que tienen ambos agentes desinfectantes para llegar a dichos niveles.

Por su parte de las tabletas de Cloro comercial, al emplear la ecuación 3,2 se determinó que para llegar a los niveles de 2.44 – 3.64 ppm se requiere aproximadamente entre 88 a 106 tabletas de Cloro, la cuales cuestan \$0.85 la unidad, siendo \$74.8 - \$90.1 por cada aplicación, y asumiendo que las tabletas demoren aproximadamente 3 semanas en consumirse involucraría un coste mensual de aproximadamente \$165.68. Otro rasgo a tener en cuenta es la factibilidad y seguridad, pues se presenta el problema de transporte y aplicación, pues el llevar la cantidad de tabletas de Cloro al reservorio para su aplicación supone un gran riesgo para los operadores, siendo que se encuentra a una distancia considerable y con una accesibilidad limitada por carretera. Otro aspecto para recalcar es la posibilidad de la formación de subproductos nocivos, pues las tabletas están formadas de Ácido Tricloroisocianúrico, por lo cual corren el riesgo de generar ácido cianúrico, el cual actúa como estabilizador de Cloro reduciendo la eficiencia de la desinfección.

En el caso del Hipoclorito de Sodio, asumimos que se emplea en su máxima concentración posible por el sistema según la ecuación 3,1: 9810.7 ppm con 24 horas de operación. Este se lo debe administrar de forma que equilibre el caudal de salida de 213 L/seg según la ecuación 3.3

$$Q_{NaClO} = \frac{Q_{salida} * C_{deseada}}{C_{NaClO}} \quad (3,3)$$

De esta manera se determinó que se necesita administrar 0.05 L/seg o 4574.48 L/día para llegar a los niveles de desinfección medidos de 0.3 ppm de acuerdo con la ecuación 3.3, tomando en cuenta que la concentración deseada consiste en la concentración medida más la demanda de cloro. A su vez para llegar al nivel de desinfección medido de 1.5 ppm se necesita administrar un caudal de hipoclorito de

sodio de 0.08 L/seg o 6824.23 L/día. Esto a su vez presenta el problema en la fabricación de esta cantidad de Hipoclorito, pues el equipo de la Junta solo es capaz de producir 37.85 L por tanda, y si se precisa llegar a la concentración máxima que requiere 24 horas de proceso, por lo que solo se podrían hacer 2 tandas al día empleando tanto el equipo CLORID L-30 como el que actualmente se encuentra en desuso. Además, este proceso requiere de la compra de sal no yodada, cuyo precio varía, asumiendo un precio de \$1 por un kilogramo, se tiene que al mes solo en producción requeriría \$2465.5.

Otra alternativa a considerar es el uso de Hipoclorito comercial, pues este posee una concentración mayor que el que se puede producir con el equipo presente, lo cual disminuye el caudal de aplicación y, a su vez, podría reducir el costo de producción. En este caso, al emplear Hipoclorito de sodio comercial con concentración de 46173.24 ppm, o 4.62%. ya verificada, se necesitaría administrar un caudal de 0.011 L/seg o 971,96 L/día para llegar a una concentración medida de cloro libre residual de 0.3 ppm; en cambio, para obtener una concentración medida de cloro libre residual de 1.5 ppm el caudal de cloro administrado de Hipoclorito comercial sería de 0.017 L/seg o 1449.98 L/día. Lo cual puesto en perspectiva indica que para llegar a una concentración medida de 0.3 ppm, valor que representa el límite inferior establecido por la normativa, el caudal del hipoclorito de sodio producido por el equipo CLORID L-30 es 4.5 veces mayor que el requerido para alcanzar la misma concentración medida de cloro libre residual con el Hipoclorito de cloro comercial analizado. Comparativamente, el hipoclorito comercial permite alcanzar la misma desinfección con solo una quinta parte del caudal en comparación con el generado por el equipo. Asumiendo un costo de adquisición de \$0.60 el litro, se necesitaría entre \$17 500 y \$26 100

En consecuencia, otro aspecto relevante a considerar es la capacidad de la bomba requerida y, por ende, el costo asociado a su implementación. Esto también genera inconvenientes a la hora de seleccionar una bomba capaz de administrar el caudal de cloro generado por el equipo CLORID L-30, que es de al menos 0.05 L/seg, y que además cumpla con los parámetros de operación correspondientes (ya sea de tipo peristáltica o de diafragma), al mismo tiempo que resista la basicidad del hipoclorito de sodio para evitar la corrosión y el desgaste prematuro de las mangueras.

En lo que respecta a la movilización y factibilidad, dado que el equipo de CLORID L-30 es de fácil instalación, es posible moverlo cerca de la toma unión de tuberías del sistema, donde se tiene fácil acceso y permitía tener un control más preciso del sistema.

3.5. Diseño del sistema de inyección del hipoclorito de sodio

El esquema de bypass para inyección de cloro funciona como un desvío temporal del agua de la tubería principal hacia un pequeño circuito secundario. En este recorrido, el agua recibe la dosis exacta de cloro antes de reincorporarse, asegurando una desinfección adecuada sin interrumpir el flujo normal del sistema.

Figura 6.

Sistema de Bypass para el sistema de inyección de hipoclorito de sodio

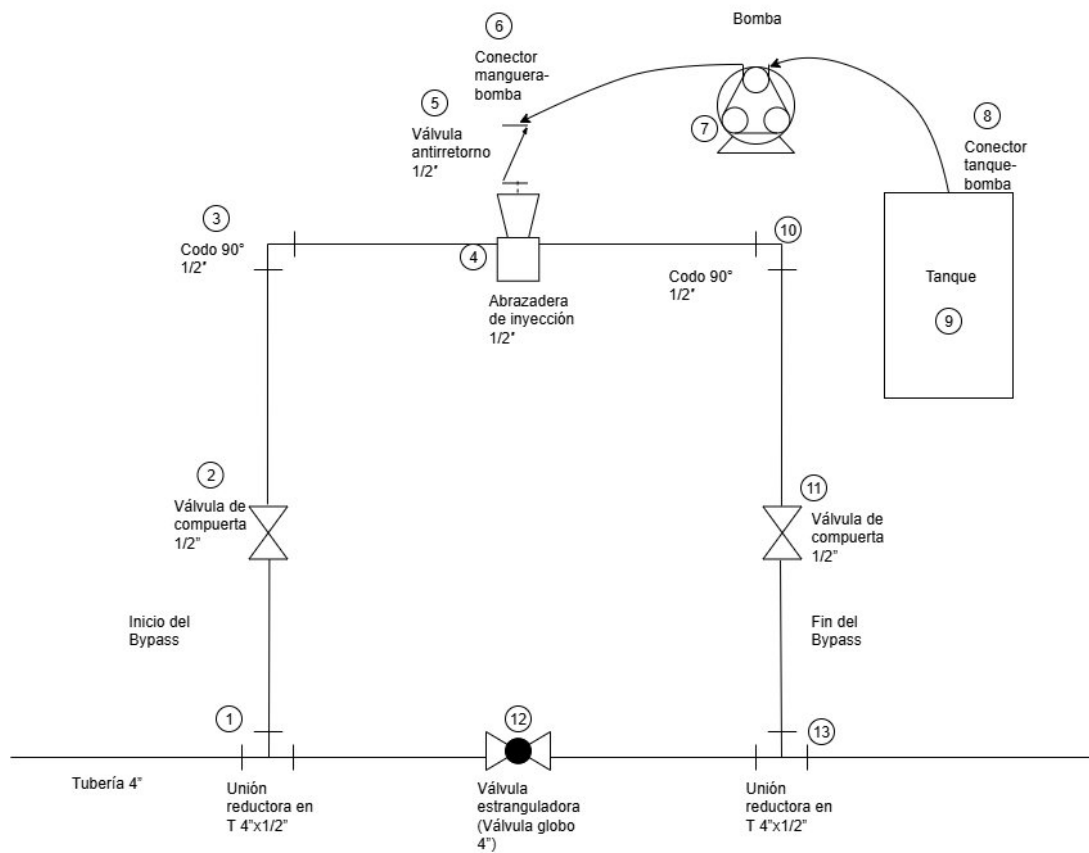


Tabla 6.

Descripción de los accesorios y equipos del sistema Bypass.

Nombre de Componentes	Descripción / Función	Cantidad
Unión reductora en T 4"x1/2"	Conexión de la tubería principal (4") con la derivación hacia el bypass	2
Válvula de compuerta 1/2"	Aísla o permite el paso de flujo dentro del bypass	2
Codo 90° 1/2"	Permite cambio de dirección de la tubería en el bypass	2
Abrazadera de inyección 1/2"	Punto de inyección del hipoclorito a la línea	1

Válvula antirretorno 1/2"	Evita el retroceso del hipoclorito hacia la bomba	1
Conector manguera-bomba	Unión de la manguera de impulsión con la bomba	1
Bomba dosificadora	Bomba que alimenta el flujo de hipoclorito hacia la tubería principal	1
Conector tanque-bomba	Conexión entre el tanque de almacenamiento y la bomba	1
Tanque de solución	Tanque de almacenamiento de la solución de hipoclorito	1
Válvula estranguladora (globo 4")	Regula el caudal en la tubería principal de 4" para permitir la dosificación adecuada	1

Existen diversos tipos de bombas dosificadoras, entre las más comunes se encuentran las peristálticas y las de diafragma. La selección del tipo de bomba adecuada depende principalmente del presupuesto disponible y de los requisitos específicos de la aplicación, determinados por parámetros como el caudal de dosificación y la capacidad de presión que se necesita alcanzar. En general, un incremento en el caudal y en la presión de trabajo exige motores más potentes y tuberías de mayor diámetro, lo que a su vez se traduce en un incremento directo del costo del equipo (*How Much Does a Peristaltic Pump Cost?*, 2025).

Para caudales de 40–60 L/h (hipoclorito comercial) tanto las bombas de diafragma (0,1–1.000 L/h) como las peristálticas (mililitros/minuto a varios m³/h) pueden cubrir la demanda; mientras que para caudales más altos de 190–285 L/h (hipoclorito producido por el CLORID L-30) también existen modelos peristálticos de rango medio que logran satisfacer la capacidad de flujo requerida. En cuanto a presión, la tubería del Bypass maneja 50 psi; si bien las de diafragma soportan hasta 290 psi, las peristálticas modernas alcanzan entre 22–29 psi y, en versiones industriales de alta presión, hasta 87–145 psi, rango suficiente para cubrir esta aplicación (*How Much Pressure Can a Peristaltic Pump Normally Reach?*, s. f.). Esto indica que, aunque ambas opciones son viables, la bomba peristáltica resulta más conveniente en este caso por su menor costo de adquisición, facilidad de mantenimiento (solo requiere cambio periódico de manguera) y su capacidad de ajuste flexible de caudal en un amplio rango operativo.

Para el dimensionamiento de la bomba para inyección de cloro de hipoclorito de sodio comercial 4.62%, se toman en cuenta los siguientes datos:

- Caudal de inyección: $Q = 285 \text{ L/h} \approx 0.079 \text{ L/s}$
- Presión en la línea principal: $50 \text{ psi} \approx 3.45 \text{ bar}$
- Pérdidas menores en manguera e inyector: 2–5 m de columna de agua

Para determinar el cabezal se usa la siguiente fórmula, el cual indica presión máxima que puede generar:

$$H_{max} \geq P_{tubería} + H_{pérdidas}$$

(3,4)

La presión total por vencer es 3.45 bar que convertido a mca equivale a 35.2 mca e incluyendo el valor típico de las perdidas menores en manguera e inyector que es 5 mca., lo cual da como resultado aproximadamente 40 mca. (4 bar). Este cabezal es la altura manométrica total que la bomba puede vencer en la descarga.

Las bombas dosificadoras se seleccionan según el caudal y la presión que debe superar, por lo que, al momento de adquirir una bomba, esta debe ajustarse a los requerimientos técnicos, la mejor opción es buscar una bomba con cabezal mayor o igual a 4 bar. Para bombas peristálticas o de diafragma, la potencia necesaria es muy pequeña porque el caudal es bajo y el fluido tiene densidad casi igual al agua.

Se puede calcular la potencia de la bomba aproximadamente con:

$$P = \rho * g * Q * H \quad (3,5)$$

Donde:

- $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $Q = 0.079 \text{ L/s} = 7.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 40 \text{ m}$

$$P = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) * (9.81 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}) * (7.9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}) * (40 \text{ m})$$

$$P = 31 \frac{\text{J}}{\text{seg}}$$

La potencia requerida es mínima (30 W), por lo que la mayoría de las bombas peristálticas comerciales de 0–300 L/h tienen potencia suficiente.

Tabla 7.

Características del equipo de bombeo

Parámetro	Valor recomendado
Caudal	285 L/h
Presión/cabezal	≥ 4 bar (40m ca.)
Potencia estimada	~30 W
Tipo de bomba	Peristáltica

Se eligió una bomba peristáltica porque garantiza una dosificación precisa, soporta fluidos corrosivos como el hipoclorito de sodio, es más asequible, y se encuentra disponible este tipo de bombas más ampliamente a nivel latinoamericano.

En cuestión a bombas de dosificación de peristálticas, el rango de precio de este tipo de bomba se encuentra entre los \$100 – \$2,500 dependiendo de la marca y especificaciones técnicas. Unas de las marcas de bombas que cumple con los requisitos de operación es la bomba DULCOFLEX DFYa de ProMinent, la cual es una opción confiable para dosificar productos químicos, y funciona bien incluso con líquidos viscosos o agresivos. Puede manejar caudales de 5.1 a 410 L/h y presiones de hasta 8 bar (116 psi). La DFYa está diseñada para trabajar de manera confiable incluso en condiciones de alta contrapresión. Su cabezal soporta hasta 8 bar (81,6 m.c.a.), lo que asegura una dosificación estable en sistemas presurizados, como redes de distribución o procesos industriales. Su diseño con control electrónico y sin válvulas ni sellos mecánicos hace que sea más segura y fácil de mantener (*DULCOFLEX DFYa - Bomba peristáltica by ProMinent Group | DirectIndustry, s. f.*). Está disponible a través de distribuidores en América Latina, y su precio ronda los \$ 1,800.

Capítulo 4

4.

4.1. Conclusiones

Para alcanzar niveles recomendables de Cloro libre 0.3 – 1.15 ppm y asegurar la desinfección de agua a un nivel apto para consumo humano se requiere de la dosificación de 2.44 – 3.64 ppm de agente desinfectante. Este nivel se obtiene aplicando aproximadamente 90 tabletas de Cloro comercial, durando aproximadamente medio mes hasta una nueva aplicación. Mientras que empleando Hipoclorito de Sodio producido localmente se necesitaría una aplicación de 0.08 L/s de manera constante mientras el canal de salida del reservorio se encuentre abierto.

Empleando un tanque de agua doméstico, se imita las condiciones del sistema del reservorio al igualar el tiempo de retención promedio que posee el reservorio cuando opera a máximo flujo. De manera similar se realizan corridas con diferentes volúmenes con el fin de determinar una relación entre el volumen empleado y el tiempo de vida del agente desinfectante. Sin embargo es importante recalcar que, debido a las dimensiones significativamente grandes del reservorio, una aproximación más real al sistema se consideraría una mejor opción pues tiene menor riesgos de inexactitud.

El equipo Clorid L-30 tiene un tiempo de operación máximos de 24 horas, sin embargo la Junta del Agua ha optado por usarlo por 12 horas por tanda, permitiendo usarlo de forma pasiva durante la noche. Con este proceso se llega a una concentración máxima de 4791.7 ppm (0.48 % v/v), consumiendo un aproximadamente 1020.6 gramos de sal y produciendo 37.85 litros, dicho consumo y producto puede llegar a duplicarse si se habilita para operación el equipo paralelo disponible actualmente en las instalaciones de la junta.

El uso de tabletas de Cloro comercial provee una opción más asequible en el aspecto económico, pues la adquisición mensual de estos (en su precio actual de \$0.85) amasa a un máximo de \$90.1, sin necesitar de ninguna instalación de equipo extra para su aplicación. Sin embargo es importante tener en cuenta que la aplicación de la dosis recomendada para alcanzar niveles de 0.3 - 1.5 ppm (88 tabletas) implica que el operario necesitaría administrar esta gran cantidad desde una altura significativa, lo cual lo pone en riesgo a sufrir caídas y lesiones; además que el sistema al pasar por fases de sistema cerrado y semicerrado no reguladas implica que las tabletas no se descomponen a un ritmo regular, lo cual implica que es necesario un control regular sobre el estado de las tabletas dentro del reservorio para determinar si es necesario introducir la siguiente dosis o no. Por su parte, la aplicación de Hipoclorito de Sodio, tanto el producido localmente como el comercial, implica un mayor costo de inversión tanto en la adquisición/producción del agente desinfectante como en la instalación de un sistema inyección, pero también implica un mayor control en la aplicación de este, siendo posible parar el bombeo cuando el sistema se encuentre cerrado y activarlo cuando se vuelva a abrir, asegurando una desinfección adecuada. Además, es importante tener en cuenta que la aplicación de Hipoclorito de Sodio genera menos productos secundarios, reduciendo el riesgo de enfermedades e intoxicación

4.2. Recomendaciones

El mayor obstáculo que se presentó a lo largo del proyecto fue la ubicación de la zona de estudio, pues impedía un análisis exhaustivo debido a la falta de equipo e instalaciones cercanas que permitan un análisis más exacto de características relevantes del sistema. Para lo cual se recomienda en futuros análisis estas consideraciones:

- Integrar un mapa de la red de distribución de agua, de modo que se pueda determinar el camino y la cantidad de usuarios del agua del reservorio.
- Definir horarios en los que el sistema se encuentre cerrado para determinar con mayor exactitud el tiempo de vida de las tabletas comerciales.
- Adaptar la instalación del equipo Clorid L-30 de modo que se pueda realizar un análisis más exacto de la concentración de Hipoclorito que es capaz de producir. A su vez esta adaptación también podría generar medidas para evitar la degradación de Hipoclorito de Sodio como el manejo de temperaturas estables bajas o la adición de sustancias que mantengan el pH en un nivel elevado como el Hidróxido de Sodio.

1

1.4

Referencias

- Abril, N., Bárcena, A., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., Toribio, F., & Túnez, I. (2000). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Universidad de Córdoba: Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. http://www.uco.es/dptos/bioquimica-biolmol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
- Bridgewater, L. L., Baird, R. B., Eaton, A. D., Rice, E. W., American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation (Eds.). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd edition). American Public Health Association.
- Cervero, C., & García, E. (2018). *Piscinas de uso colectivo. Tratamiento del agua, mantenimiento y limpieza* (Pág 127). Ediciones de la U. https://www.google.com.ec/books/edition/Piscinas_de_uso_colectivo/ITSjDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=reacción+entre+ácido+tricloroisocianúrico+y+agua&pg=PA198&printsec=frontcover
- Clorid S.A. (2020). *L-30*. <https://www.clorid.com/l30>
- Dadi, M., & Yasir, M. (2022). Spectroscopy and Spectrophotometry: Principles and Applications for Colorimetric and Related Other Analysis. En A. Kumar Samanta (Ed.), *Colorimetry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101106>
- DULCOFLEX DFYa—Bomba peristáltica by ProMinent Group | DirectIndustry*. (s. f.). Recuperado 31 de agosto de 2025, de <https://www.directindustry.es/prod/prominent-group/product-6048-2261427.html>

Dunnick, J., & Melnick, R. (1993). JNCI: Journal of the National Cancer Institute. *Assessment of the Carcinogenic Potential of Chlorinated Water: Experimental Studies of Chlorine, Chloramine, and Trihalomethanes*, 85(10), 817–822.
<https://doi.org/10.1093/jnci/85.10.817>

González Luque, R. (2011). *Química General para Las Ciencias Ambientales* (1st ed).
Universidad de València Servicio de Publicaciones.
https://www.google.com.ec/books/edition/Qu%C3%ADmica_general_para_las_ciencias_ambie/dF7al6i3AXgC?hl=es&gbpv=1&dq=reacci%C3%B3n+entre+%C3%A1cido+tricl+oroisocian%C3%BArico+y+agua&pg=PA270&printsec=frontcover

How Much Does a Peristaltic Pump Cost? A Complete Buying Guide (2025) - JIHPUMP. (2025, mayo 26). <https://www.jihpump.net/technical-support/blogs/how-much-does-a-peristaltic-pump-cost-a-complete-buying-guide-2025>

How much pressure can a peristaltic pump normally reach? - Chonry® Peristaltic Pump Manufacturer. (s. f.). Baoding Chuangrui Precision Pump Co., Ltd. Recuperado 31 de agosto de 2025, de <https://www.crpump.com/news-pump/how-much-pressure-can-a-peristaltic-pump-normally-reach.html/>

Howard, G., Bartram, J., Williams, A., Overbo, A., Fuente, A., Geere, J. (2020). *Domestic water quantity, service level and health*, 2nd ed. World Health Organization.
<https://iris.who.int/handle/10665/338044>

Instituto Ecuatoriano de Normalización INE. (2014). *AGUA POTABLE. REQUISITOS*. Norma Técnica Ecuatoriana 1108. <https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%201108%20-%20AGUA%20POTABLE.%20REQUISITOS.pdf>

Martin, A. C., Ladner, D., Vaughn, D., Murdoch, L., & Cates, E. (2020). *Evaluation of Tablet Chlorinator for a Rural Haitian Water Treatment System-Computational Modeling and Laboratory Testing*.
Evaluation of Tablet Chlorinator for a Rural Haitian Water Treatment System-Computational Modeling and Laboratory Testing.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33540.19849>

Metcalf & Eddy, Inc, Tchobanoglous, G., Stensel, D. H., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., Pfrang, W., & Albert Einstein College of Medicine (Eds.). (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (Fifth Edition). McGraw-Hill Education.

Olin Corporation. (2024). *Sodium Hypochlorite Product Stewardship Manual*. Olin Chlor Alkali.

<https://olinchloralkali.com/wp-content/uploads/2023/10/102-00553-0424-Olin-Sodium-Hypochlorite-PSM.pdf>

Rochenszwalb Muñoz R. & Figueroa Naranjo L. (2023). Comparación de la Concentración de Hipoclorito de Sodio en la Atención Dental entre Dentistas Generales y Especialistas en Endodoncia. *Avances En Odontoestomatología*, 39(5), 230-240.


https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-12852023000500005

Rodríguez, C. I. (2014). *Evaluación ambiental del uso y gestión del agua subterránea en el partido de Tandil. Pautas para su gestión sustentable*. [Tesis de Doctorado Universidad Nacional De La Plata Facultad De Ciencias Naturales Y Museo]. Sedici.

https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34169/Documento_completo__%20Rodriguez%20Corina.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- R. Destiani, M.R. Templeton. (2019). AIMS Environmental Science. *Chlorination and ultraviolet disinfection of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes in drinking water.*, 6(3), 222-241. <https://doi.org/10.3934/environsci.2019.3.222>
- Vargas, T. F., Baía, C. C., Machado, T. L. D. S., Dórea, C. C., & Bastos, W. R. (2021). Decay of Free Residual Chlorine in Wells Water of Northern Brazil. *Water*, 13(7), 992. <https://doi.org/10.3390/w13070992>
- Varó Galvañ, P. J., & Segura Beneyto, M. (2009). *Curso de manipulador de agua de consumo humano*. España: Universitat d' Alacant (Publicacions). https://www.google.com.ec/books/edition/Curso_de_manipulador_de_agua_de_consumo/qKOAkGkYE1QC?hl=es&gbpv=0
- Wahman, D. G. (2018). Chlorinated Cyanurates: Review of Water Chemistry and Associated Drinking Water Implications. *Journal AWWA*, 110(9). <https://doi.org/10.1002/awwa.1086>
- World Health Organization, (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf>
- Xingfei Chemical. (2024). News—What is the reaction of Trichloroisocyanuric Acid with water? <https://www.xingfeichemical.com/news/what-is-the-reaction-of-trichloroisocyanuric-acid-with-water-2/>

Apéndice A

	Reactivo	<i>Hipoclorito de sodio</i>
Indicaciones de peligro:	Pictograma de seguridad	
	Indicaciones de peligro	H290 Puede ser corrosivo para los metales. H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. H410 Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
	Palabra de advertencia	Peligro
Manipulación		Sin indicaciones particulares.
Almacenamiento		P403+P233 Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente herméticamente cerrado
Consejos de prudencia	Prevención	P260 No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol. P273 Evitar su liberación al medio ambiente. P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección
Primeros auxilios	Ojos	P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.
	Inhalación	Llevar al accidentado al aire libre y mantenerlo en reposo y abrigado.
	Piel	P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua o ducharse.
	Ingestión	No provocar el vómito en ningún caso. CONSULTAR INMEDIATAMENTE AL MÉDICO
Precauciones ambientales		Evitar que el producto penetre en el suelo/subsuelo. Evitar que penetre en aguas superficiales o en el alcantarillado. Conservar el agua de lavado contaminada y eliminarla. En caso de fuga de gas o penetración en cursos de agua, suelo o sistema de alcantarillado, informar a las autoridades responsables. Material apropiado para la recogida: material

	absorbente, orgánico, arena
Estabilidad y reactividad	Materias incompatibles: Manténgase alejado de los ácidos.

Apéndice B

Declaración Expresa

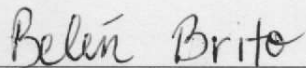
Nosotros María Belén Brito Coox & Danilo Sergio Romanó Bustamante acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

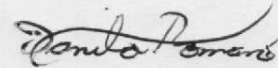
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 Mayo del 2025.



María Belén Brito Coox



Danilo Sergio Romanó

Bustamante

Declaración Expresa

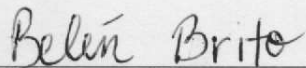
Nosotros María Belén Brito Coox & Danilo Sergio Romanó Bustamante acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores.

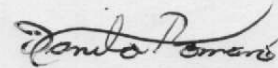
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 Mayo del 2025.



María Belén Brito Coox



Danilo Sergio Romanó

Bustamante

Apéndice C

PRODUCCIÓN DE CLORO

GUIA DE USO

01 PREPARACIÓN

EXTRAER TODO MATERIAL RESIDUAL EXISTENTE EN EL EQUIPO, Y LAVAR CUIDADOSAMENTE, ENJUAGANDO TODO CLORO RESIDUAL DEL EQUIPO

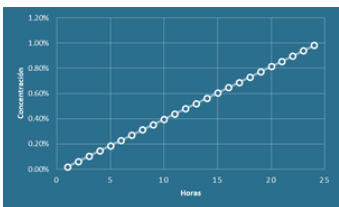


02 ALIMENTACIÓN

AGREGAR SUFICIENTE AGUA HASTA QUE LOS ELECTRODOS SE ENCUENTREN COMPLETAMENTE SUMERGIDOS Y AGREGAR APROXIMADAMENTE 1 KILOGRAMO DE SAL NO YODADA. PUEDE REVOLVER LA MEZCLA PARA ASEGURAR LA DISOLUCIÓN

03 TIEMPO DE USO

TAPAR EL EQUIPO Y ENCENDER. EL TIEMPO DE OPERACIÓN DEPENDE DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO A LA QUE SE DESEA LLEGAR. ASEGURARSE DE VENTILAR LA HABITACIÓN.



Horas	Concentración de Cloro
1	0,02%
6	0,23%
12	0,48%
18	0,73%
24	0,98%

04 EXTRACCIÓN

APAGAR EL EQUIPO Y VACIAR EL CONTENIDO. EMPLEAR GUANTES DE NITRIL Y MASCARILLA PARA GASES DURANTE EL PROCESO



05 ALMACENAMIENTO

DEPOSITAR EL CONTENIDO EN CONTENEDORES AMBAR O OSCUROS QUE ABSORBAN POCOA LUZ. DEPOSITAR LOS CONTENEDORES EN LUGARES VENTILADOS, REFRIGERADOS Y CON POCOA EXPOSICIÓN A LA LUZ