



## **Estandarización de consumo de agua de lavado y recirculación del agua clarificada**

Leidy Lorena Cano Muñoz

Trabajo de grado presentado Para optar al título de Ingeniera Química

Asesores

Douglas Ramón Rodríguez Ordoñez, Profesor Departamento de Ingeniería Química en  
Universidad de Antioquia

John Jairo Arteaga Toro, Coordinador de Aseguramiento de Procesos en Pintuco

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Química  
Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Cano Muñoz [1]
<b>Referencia</b>	[1] L. L. Cano Muñoz, “Estandarización de consumo de agua de lavado y recirculación de agua clarificada”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Lina María Gonzáles Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
I. INTRODUCCIÓN .....	9
II. OBJETIVOS .....	11
III. MARCO TEÓRICO .....	12
IV. METODOLOGÍA .....	15
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	16
A. Tecnologías actuales de tratamiento de agua residual de la industria de pintura.....	16
B. Consumos de agua en planta e ingresos a la planta de tratamiento.....	16
C. Actualización de estándares de lavado.....	21
D. Pruebas a escala piloto para desinfección del agua clarificada con radiación ultravioleta y ozono .....	23
E. Evaluación de resultados de desinfección con las tecnologías para posible implementación a gran escala .....	30
VI. CONCLUSIONES .....	35
REFERENCIAS .....	36

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. MECANISMOS DE ACCIÓN DE AGENTES DESINFECTANTES .....	13
TABLA II. CONDICIONES DE LAS MUESTRAS TRATADAS .....	24
TABLA III. EVALUACIÓN DE MICROORGANISMOS .....	24
TABLA IV. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBA 1 .....	26
TABLA V. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBAS 2 Y 3 .....	27
TABLA VI. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBA 4 .....	28

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Mapa del origen de las aguas residuales .....	17
Fig. 2 Distribución del consumo de agua .....	18
Fig. 3 Relación entre galones producidos y vertimiento por galón.....	18
Fig. 4 Manguera para lavado de tuberías de hidrolavadora .....	19
Fig. 5 Boquilla anti salpicaduras de hidrolavadora .....	19
Fig. 6 Estrategias de concientización .....	20
Fig. 7 Cantidad de IBC almacenados .....	20
Fig. 8 Formato tarjeta registro de agua de lavado .....	21
Fig. 9 Consumo promedio de agua entre colores .....	22
Fig. 10 Ejemplo cantidades estándares de lavado .....	22
Fig. 11 Diagrama de prueba piloto de desinfección agua clarificada .....	23
Fig. 12 Comportamiento de cantidad de bacterias según la potencia UV.....	25
Fig. 13 Comportamiento de cantidad de bacterias según la concentración de ozono .....	25
Fig. 14 Burbujas de ozono con difusor .....	30
Fig. 15 Burbujas de ozono sin difusor.....	30
Fig. 16 Historial de generación de agua clarificada por días .....	31
Fig. 17 Planta de oxidación avanzada Synertech .....	32
Fig. 18 Sistema de ozono y ultravioleta propuesto .....	33

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>AOP</b>	Procesos de Oxidación Avanzada
<b>PBA</b>	Planta Base Agua
<b>MBR</b>	Reactor Biológico De Membranas
<b>IBC</b>	Contenedor a granel intermedio
<b>PTARI</b>	Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia

---

## RESUMEN

La fabricación de pinturas utiliza grandes cantidades de agua y por lo tanto produce un gran volumen de aguas residuales contaminadas con diversos productos químicos. Estas aguas deben cumplir características específicas de carga orgánica y sólidos antes de ser vertidas y en Pintuco esto se logra internamente en la planta de tratamiento de agua residual industrial que cuenta con un proceso de coagulación-floculación-sedimentación y un reactor microbiológico de membranas. Sin embargo, debido a la baja capacidad del reactor de membrana una gran problemática para la compañía es la acumulación de agua clarificada y con pintura, siendo necesario buscar diferentes alternativas de solución. Una de las alternativas consistió en el mejoramiento del estándar de lavados y herramientas para disminuir el consumo de agua, adicionalmente se realizó un piloto de desinfección con UV y ozono del agua clarificada para reutilizarla en lavados, estas tecnologías demostraron efectividad en la eliminación de microorganismos por lo que se inició el diseño para implementación a una capacidad de 25 m<sup>3</sup>/día. Las acciones tomadas contribuyeron a una disminución superior al 60% de almacenamiento de agua sin tratar y menor cantidad de agua consumida por galón de pintura producida.

***Palabras clave*** — Agua clarificada, ahorro de agua, ultravioleta, ozono, desinfección

---

**ABSTRACT**

The manufacture of paints uses large amounts of water and, therefore, produces a large volume of wastewater contaminated with various chemicals, these waters must meet specific characteristics of organic load and solids to be poured, in Pintuco this is achieved internally in the industrial wastewater treatment plant that has a process of coagulation-flocculation-sedimentation and a microbiological reactor membrane. Due to the low capacity of the reactor, clarified and painted water has accumulated, which represents a major problem for the company. One of the alternatives was to improve the standard of washing and tools to reduce water consumption, additionally a pilot disinfection with UV and ozone of clarified water for reuse in washing, these technologies proved effective in eliminating microorganisms so began the design for implementation at a capacity of 25 m<sup>3</sup>/ day. The actions taken contributed to a decrease of more than 60% of raw water storage and less water consumed per gallon of paint produced.

***Keywords* — Clarified water, water saving, ultraviolet, ozone, disinfection.**

## I. INTRODUCCIÓN

Pintuco es una multinacional perteneciente al grupo Orbis, líder en pinturas con más de 75 años de experiencia, cuenta con tres unidades de negocio que permiten entregar soluciones innovadoras y sostenibles para hogares, construcción, infraestructura, industria y automotriz. Actualmente en la fábrica de Rionegro, la compañía cuenta con tres plantas de producción, las cuales son: Planta Base Agua, Planta Pintura en Polvo y Planta Recubrimientos Industriales.

El propósito superior de Pintuco es “*Transformar y proteger con color*” orientado a que al pintar se previene el deterioro de las superficies y se aporta color, provocando diferentes percepciones visuales [1]. La pintura tiene cuatro componentes que dan su clasificación y aportan cualidades específicas que le permiten cumplir el propósito, estos son: material ligante, solventes, pigmentos y aditivos. De acuerdo con el solvente utilizado, la pintura se clasifica como base de agua o base solvente, las pinturas a base de agua tienen diversas aplicaciones tanto en interiores como exteriores y una de sus mayores ventajas es la posibilidad de dilución en agua. Al utilizar el agua como solvente, las industrias han buscado alternativas para utilizar de manera sostenible este recurso. Con este objetivo, en Pintuco se han tomado acciones para disminuir el consumo de agua a través de implementación de herramientas de menor consumo, estandarización los procesos de lavado y reutilización de agua.

La fabricación de pinturas utiliza grandes cantidades de agua y por lo tanto produce un gran volumen de aguas residuales contaminadas con diversos productos químicos. Actualmente las aguas residuales industriales en la fábrica de Rionegro son tratadas en la planta de tratamiento de agua residual industrial (PTARI) que cuenta con un proceso de coagulación-floculación-sedimentación y un reactor microbiológico de membranas (MBR). Estos procedimientos aseguran que la disposición del agua está de acuerdo con la norma de vertimientos en la Resolución 0631 de 2015 pero sin la posibilidad de reutilización [2]. Un cuello de botella que actualmente presenta el tratamiento de agua es la baja capacidad del MBR causando la acumulación de agua contaminada con pintura, que sumado a las limitaciones en la reutilización del agua debido la contaminación microbiológica impide su reúso, porque la calidad del producto y su vida útil se verían afectados. Debido a lo anterior, se han propuesto buscar alternativas para descontaminar el agua y obtener un

---

agua con la calidad suficiente para retornar al proceso y así disminuir el agua que ingresa a la PTARI.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar acciones que contribuyan a disminuir el consumo de agua en la planta de pinturas base de agua

### *B. Objetivos específicos*

- Examinar los registros de consumo de agua de lavado en el área de envasado
- Establecer un estándar de cantidad máxima de agua a utilizar en los lavados de las líneas de envasado
- Realizar pruebas de desinfección en el agua clarificada mediante tecnología ultravioleta y ozono combinadas
- Determinar viabilidad de reutilización del agua clarificada desinfectada como agua de lavado o materia prima en productos

### III. MARCO TEÓRICO

Las industrias de fabricación de pinturas producen aguas residuales que contienen una elevada demanda química de oxígeno y turbidez, además, sólidos en suspensión y metales pesados que causan enormes daños ambientales. Estas aguas pueden ser tratadas con diferentes métodos que se esperan sean sostenibles, desde el punto de vista medioambiental, económico y ético [3]. Las aguas tratadas pueden ser reutilizadas con fines beneficiosos como riego, refrigeración o limpieza, buscando sustituir con agua recuperada aplicaciones que no requieren suministros de agua de alta calidad, sin embargo, el principal obstáculo asociado con el reciclaje de agua en los procesos de fabricación de pinturas a base de agua es la contaminación microbiana, razón que ha llevado a investigar sobre las técnicas de desinfección apropiadas para este caso. Idealmente, los procesos desinfectantes deben ser seguros de manipular, no tóxico para formas de vida superiores a los microorganismos, y deben producir pocos residuos, entre otras características [4]. Algunos conceptos importantes en este tema son:

**Agua clarificada:** es aquella que se obtiene luego eliminar sólidos en suspensión y partículas con la ayuda de floculantes y coagulantes, que mejoran la sedimentación [5].

**Desinfección:** procedimiento que, utilizando técnicas físicas o químicas, permite eliminar, matar, inactivar o inhibir a un gran número de microorganismos encontrados en el ambiente. Dependiendo del agente antimicrobiano utilizado, lograremos una desinfección o un efecto esterilizante [6].

**DQO:** la demanda química de oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo [7].

**Sólidos suspendidos:** se refieren a pequeñas partículas sólidas que permanecen en suspensión en agua como un coloide o debido al movimiento del agua.

**Desinfección por agentes químicos:** el cloro y sus compuestos y el ozono son los principales compuestos químicos empleados para la desinfección del agua regenerada. La desinfección con

agentes químicos se logra mezclando completamente el agente desinfectante diluido con el líquido a desinfectar y dejando el tiempo suficiente para que el desinfectante reaccione con los microorganismos que pueden estar presentes en el líquido [8].

**Desinfección por radiación:** los principales tipos de radiación son electromagnéticos, acústicos y de partículas. Por ejemplo, la descomposición de los microorganismos observada en los estanques de oxidación se debe, en parte, a su exposición al componente de luz ultravioleta (UV) de la luz solar del espectro electromagnético [8].

**Ozono:** el ozono es un agente oxidante muy poderoso, compuesto por un enlace simple y un enlace doble fuerte. El ozono es un gas inestable y reacciona con las sustancias en las aguas residuales de dos maneras diferentes, ya sea directamente como ozono molecular o indirectamente a través de la formación de oxidantes secundarios, es decir, radicales hidroxilo [9].

**Irradiación ultravioleta:** proceso de desinfección en el que se utiliza la exposición a la radiación ultravioleta (o luz) para inactivar microorganismos [9].

En la Tabla 1 se resumen los mecanismos de acción de la desinfección con cloro, ozono y ultravioleta:

TABLA I. MECANISMOS DE ACCIÓN DE AGENTES DESINFECTANTES

<b>Cloro</b>	<b>Ozono</b>	<b>Radicación UV</b>
Oxidación	Oxidación/ destrucción directa de la pared celular con fuga de componentes celulares fuera de la célula	Daño fotoquímico al ARN y al ADN
Reacciones con el cloro disponible	Reacciones con subproductos radicales de la descomposición del ozono	Los ácidos nucleicos de los microorganismos son los absorbentes más importantes de la energía de la luz en el rango de longitud de onda de 240 a 280 nm
Precipitación de proteínas	Daño a los componentes de los ácidos nucleicos	Dado que el ADN y el ARN contienen información genética para la reproducción, el daño de estas sustancias puede inactivar eficazmente la célula
Modificación de la permeabilidad de la pared celular	Rotura de enlaces carbono-nitrógeno, lo que conduce a la despolimerización	
Hidrólisis y rotura mecánica		

Nota: [8]

Además de la reutilización del agua, otro mecanismo para disminuir el consumo es la estandarización de los procesos de lavado, que permite eliminar desperdicios de agua a través del análisis de los tiempos requeridos en los lavados, así como también, la revisión de los procedimientos de lavado de las líneas de envasado, para identificar las cantidades de agua necesarias y el tiempo, dando límites de los máximos valores que pueden tomar estas variables.

---

#### IV. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se siguieron los siguientes pasos.

- A. Revisión del estado del arte: Búsqueda de material bibliográfico sobre las tecnologías actuales para la desinfección del agua y sus mecanismos de acción, junto con la búsqueda de opciones adicionales que contribuyan al ahorro del agua.
- B. Seguimiento de medidores de consumos de agua e ingresos a la planta: Registro diario de los datos de los medidores de agua para mensualmente actualizar la base de datos de ingresos de agua a la planta y así realizar el análisis de la distribución del agua total que ingresa y sale.
- C. Actualización de estándares de lavado: Recolección de los datos reportados por los operarios acerca de la cantidad de agua que se gasta en cada lavado para actualizar la cantidad máxima de agua que se debe utilizar según el color que se envasa y el color que continúa.
- D. Realización de pruebas a escala piloto para la desinfección del agua clarificada con radiación ultravioleta y ozono: Determinación de los experimentos a realizar en los equipos con el agua clarificada almacenada. Evaluación de los factores que se pueden manipular para analizar qué efectos tienen los mismos sobre la presencia los microorganismos. A cada muestra se le realizará análisis microbiológico y pruebas fisicoquímicas.
- E. Evaluación de resultados de desinfección con las tecnologías para posible implementación a gran escala: Luego de obtener los resultados microbiológicos y fisicoquímicos se evaluará si la desinfección fue efectiva y si es posible continuar con el diseño a mayor escala para implementación del proceso de reutilización de agua desinfectada en la planta.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *A. Tecnologías actuales de tratamiento de agua residual de la industria de pintura*

Debido a que la composición de las aguas residuales de la industria de pintura tiene una composición muy variable, su tratamiento representa un gran reto. Los tratamientos actuales incluyen tratamiento fisicoquímico, biológico y químico, estos presentan desventajas relacionadas con la generación de lodos difíciles de disponer y la incertidumbre en la composición química del agua. Por lo anterior, han emergido alternativas sostenibles como la combinación de procesos biológicos con las técnicas de oxidación avanzada que reducen significativamente la toxicidad del agua y la formación de lodos [3].

Los procesos de oxidación avanzada (AOP) son un tratamiento químico para eliminar la materia orgánica del agua residual, algunos de estos son: ozonización, degradación fotocatalítica, reactivo fenton y varios procesos acoplados como peroxona y luz ultravioleta ( $O_3/H_2O_2/UV$ ) y luz ultravioleta con ozono ( $O_3 + UV$ ). Entre los AOP existentes, la ozonización ha llamado la atención debido a que no genera lodos y el ozono residual se descompone en oxígeno, para mejorar la eficiencia de este proceso se ha propuesto utilizar tratamientos combinados como los mencionados, que permiten disminuir costos de operación y tiempo de reacción para degradar los contaminantes [9]. La literatura muestra que los AOP con técnicas combinadas tienen un alto potencial para mejorar los sistemas de tratamiento de agua, pero siguen representando un desafío en la investigación para lograr que sean más eficientes y económicos.

### *B. Consumos de agua en planta e ingresos a la planta de tratamiento.*

Como punto de partida de este proyecto, se elaboró un mapa del origen de las aguas residuales de la planta, en este se logró identificar en qué parte del proceso es generado el residuo de agua y hacía dónde es dirigido. En la PTARI Se cuenta con dos pozos de agua residual; para agua de colores y otro para agua blanca, estas son separadas desde su generación a través de la identificación de los desagües. La mencionada agua blanca corresponde a aquella que se obtiene cuando se lavan tanques, envasadoras o recipientes en los cuales fue procesado pintura blanca, esta agua se reutiliza en producción de algunas marcas de pintura de la compañía. El agua de colores es

la obtenida cuando se lavan equipos donde se procesó pintura de colores y estas son tratadas en la PTARI.

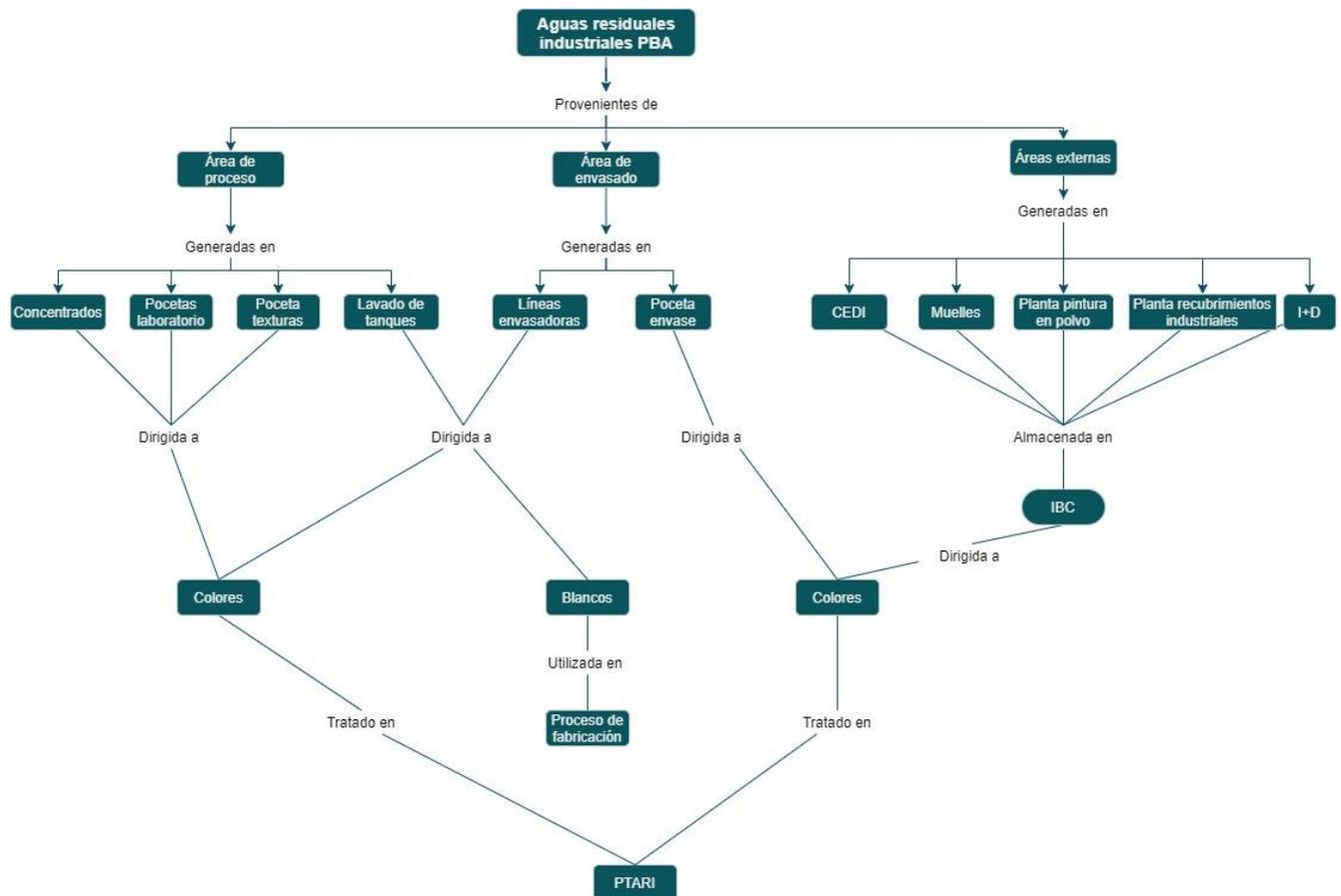


Fig. 1 Mapa del origen de las aguas residuales

De acuerdo con los registros de agua que se llevan en la planta y se recolectan de los contadores, se elaboró un diagrama para visualizar qué cantidad de agua se distribuye en cada área:

- Agua de producción: corresponde a aquella utilizada como materia prima.
  - Agua de consumo doméstico: es aquella consumida en los baños y restaurante de la planta.
- Agua de lavado: correspondiente al agua de lavado del área de producción y de envase.

La distribución del agua descrita anteriormente se muestra en la Figura 2 para el periodo enero 2021 a febrero 2022:

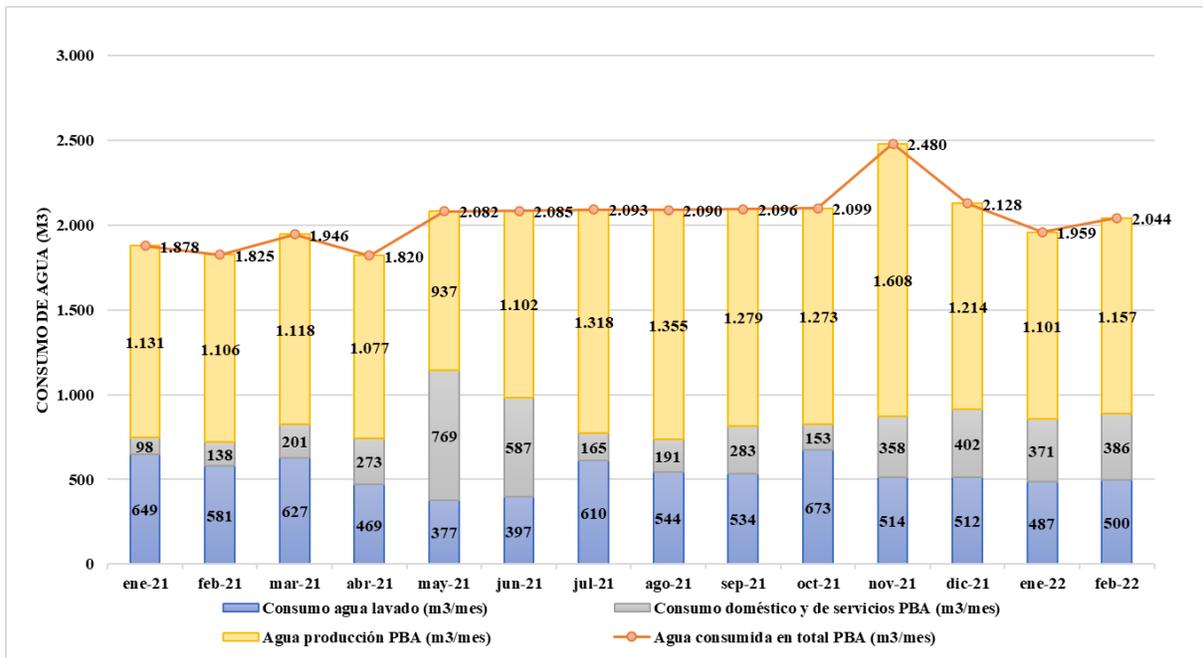


Fig. 2 Distribución del consumo de agua

Buscando relacionar el volumen de producción de PBA con el vertimiento de agua residual se creó un indicador de vertimiento por galón producido, para el cual se estableció una meta de 0.25 l/gal. En la Figura 3, se muestra la variación mensual de este indicador:

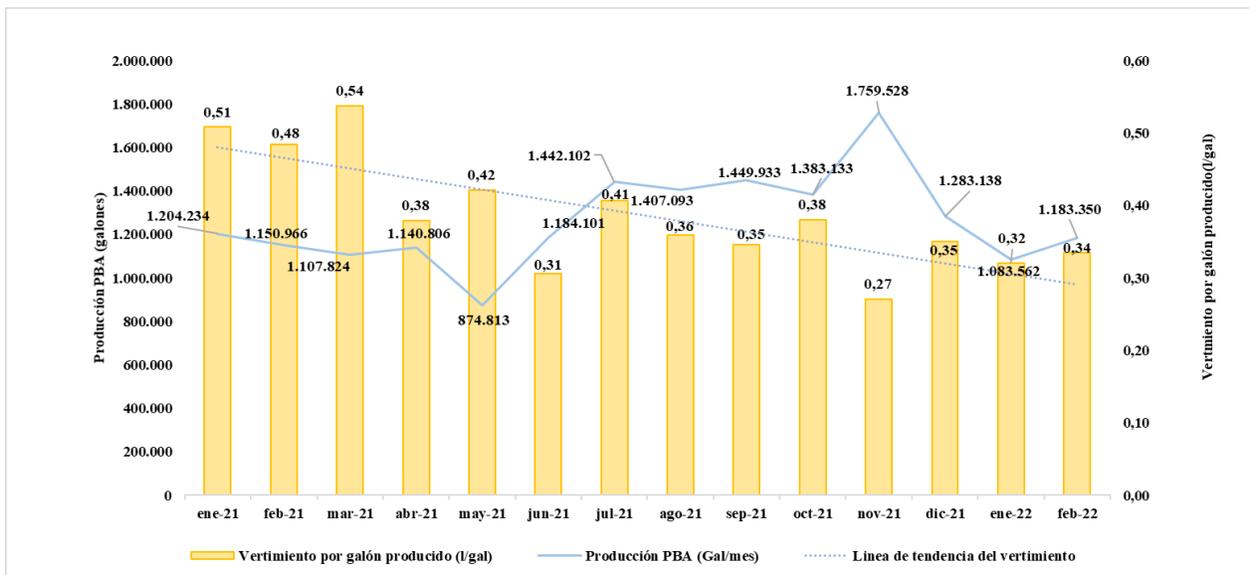


Fig. 3 Relación entre galones producidos y vertimiento por galón

En las figuras 2 y 3 se evidencia la disminución del consumo en el segundo semestre del año que es cuando empezó la implementación del proyecto, donde a pesar de las diferentes cantidades de pintura producidas y mayor consumo de agua en producción, se mantienen valores cercanos en el indicador de vertimientos y menor consumo en lavados, lo que indica que las acciones y el control que se ha realizado sobre el agua en los últimos meses ha contribuido a reducir el consumo de agua.

Por otro lado, parte de las acciones en el desarrollo de este proyecto fueron la implementación de herramientas para facilitar el uso de las hidrolavadoras como por ejemplo, mangueras flexibles que permiten lavar el interior de tuberías, lo cual no era posible con la lanza rígida (Fig. 4), así como también el uso de boquillas anti salpicaduras (Fig. 5) la cual previene que el chorro de agua a presión al chocar con las superficies lisas se devuelva hacia el trabajador. También se realizaron campañas de concientización sobre el cuidado del agua (Fig. 6).



Fig. 4 Manguera para lavado de tuberías de hidrolavadora



Fig. 5 Boquilla anti salpicaduras de hidrolavadora



Fig. 6 Estrategias de concientización

Una situación que impulsó a tomar acciones frente a la generación de aguas residuales de la empresa fue la acumulación de contenedores de agua con pintura y agua clarificada, que no podían ser tratados debido a la limitada capacidad del MBR. En la figura 7 se muestra como las labores realizadas durante este proyecto en conjunto con otras estrategias de la compañía, han mejorado directamente el almacenamiento de contenedores (IBC) con una reducción superior al 70% y con una tendencia a seguir disminuyendo.

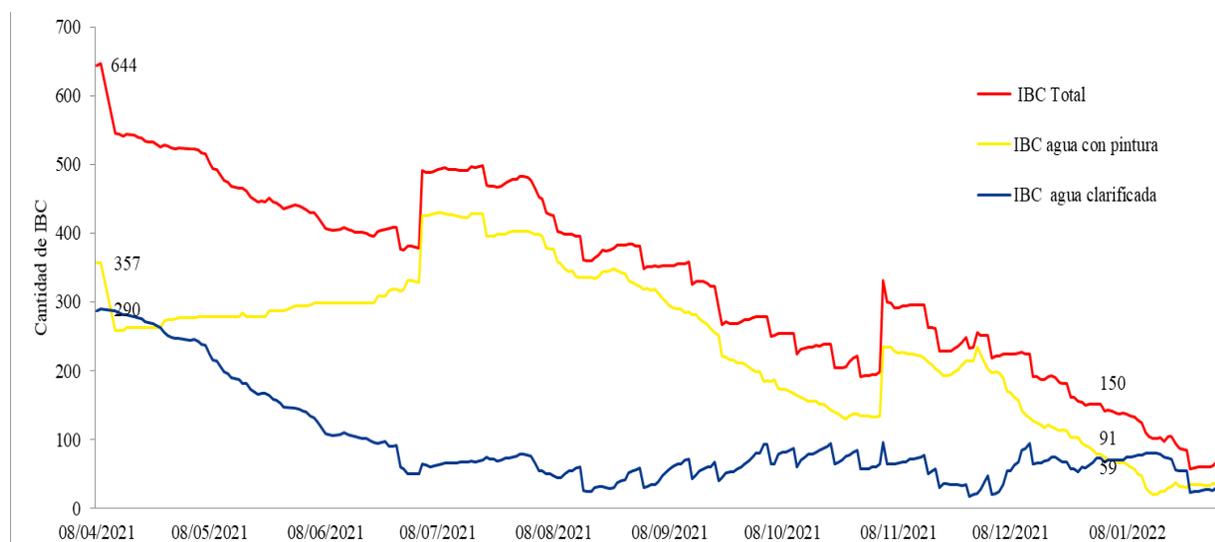


Fig. 7 Cantidad de IBC almacenados

### C. Actualización de estándares de lavado

En conjunto con los contadores, se implementó una tabla de registro (Fig. 8) en la cual los trabajadores registran el código del producto que van a lavar y el producto que continua, el turno, si utilizaron agua blanca y la cantidad de agua potable que gastaron, esta es contabilizada gracias a los medidores y permite realizar mejoras continuas a los estándares de lavado por colores.

TARJETA CONTROL AGUA DE LAVADO								
LÍNEA								
FECHA	TURNO	LAVADO	PURGA	PRODUCTO A LAVAR	PRODUCTO A ENVASAR	CANTIDAD DE AGUA BOMBADA	# MEDIDOR	¿USÓ AGUA DE LAVADO BLANCA? SI/NO
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								
DD/MM/AAAA								

Fig. 8 Formato tarjeta registro de agua de lavado

Con el seguimiento realizado en la tarjeta de control de agua se calcularon promedios entre cada cambio de color como se ilustra en la Figura 9, estos datos fueron registrados desde agosto del 2021 hasta febrero del 2022 con un total de 550 registros.

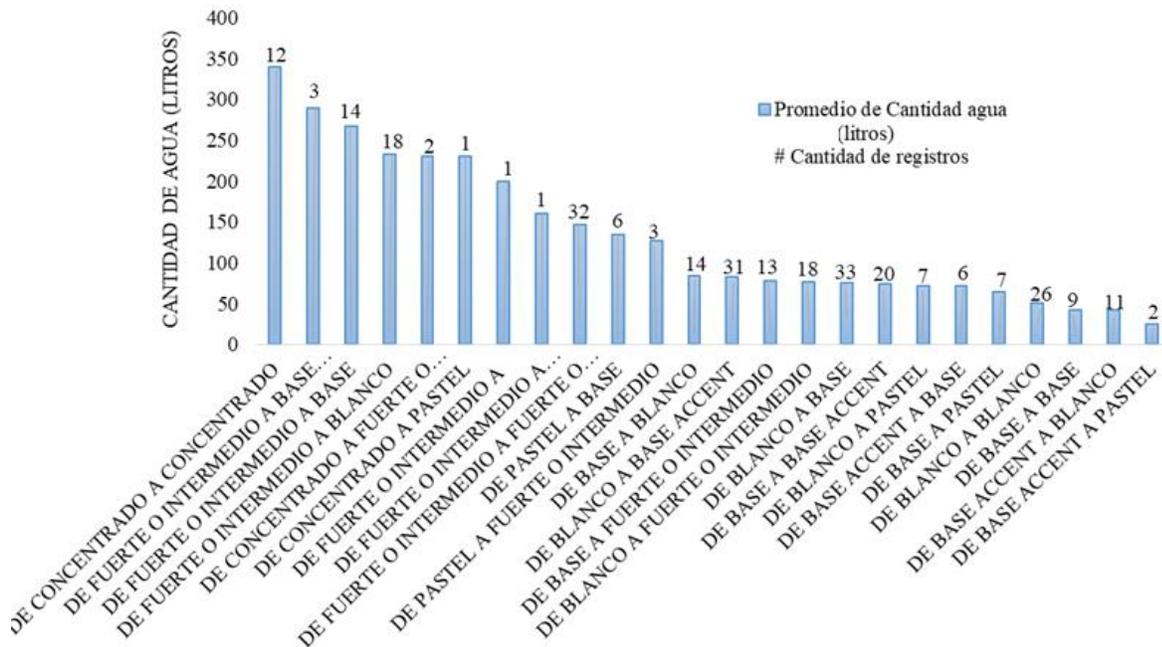


Fig. 9 Consumo promedio de agua entre colores

De acuerdo con los registros se actualizó el estándar de lavado que se tenía y se decidió discriminar la cantidad de agua teniendo en cuenta el color que se estaba envasando y el que continuaba, puesto que anteriormente solo se consideraba el color a lavar. La representación de algunos de los estándares se muestra en la Figura 10. La implementación de estándares de lavado permitió reducir la variabilidad de los consumos en cada lavado y generó conciencia sobre limitar el uso del agua a los niveles mínimos.

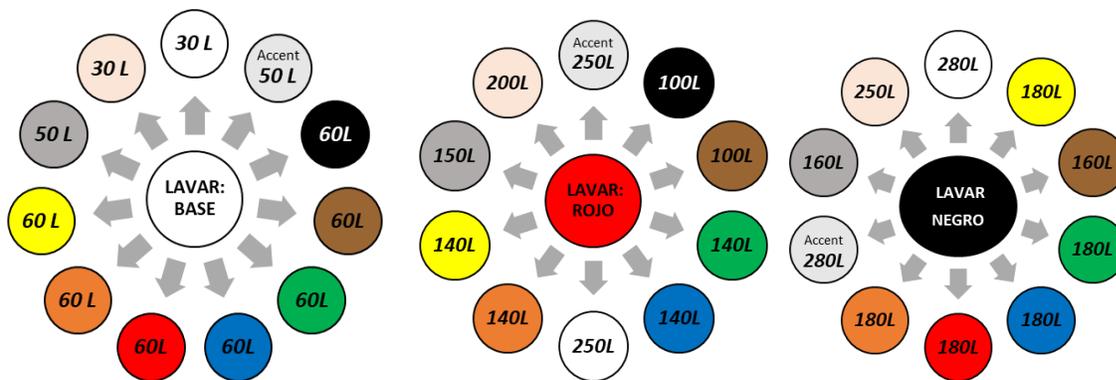


Fig. 10 Ejemplo cantidades estándares de lavado

*D. Pruebas a escala piloto para desinfección del agua clarificada con radiación ultravioleta y ozono*

Luego de revisar diferentes tecnologías de desinfección se identificó que el ozono y la radiación ultravioleta son altamente efectivos en la eliminación de microorganismos en aguas residuales, adicionalmente no generan residuos peligrosos que necesiten ser retirados aguas abajo. Por esta razón se consultó en el mercado la posibilidad de realizar pruebas con equipos piloto con el fin de evaluar si estos métodos serían efectivos en el agua clarificada. Al obtener los equipos para las pruebas piloto se diseñó el proceso ilustrado en la Fig. 11 que consistió en recolectar agua clarificada de la PTARI en un recipiente, de este se bombeó hacia un filtro de carbón activado, con el fin de eliminar turbiedad, luego el agua paso a la lámpara UV y se recolectó en un recipiente donde se determinó el volumen recolectado por diferencia de masa. Al volumen de agua conocido se le burbujeó el ozono a través de una manguera por determinado tiempo, luego se recolectó una muestra de agua inicial y final para evaluar el crecimiento de los microorganismos.

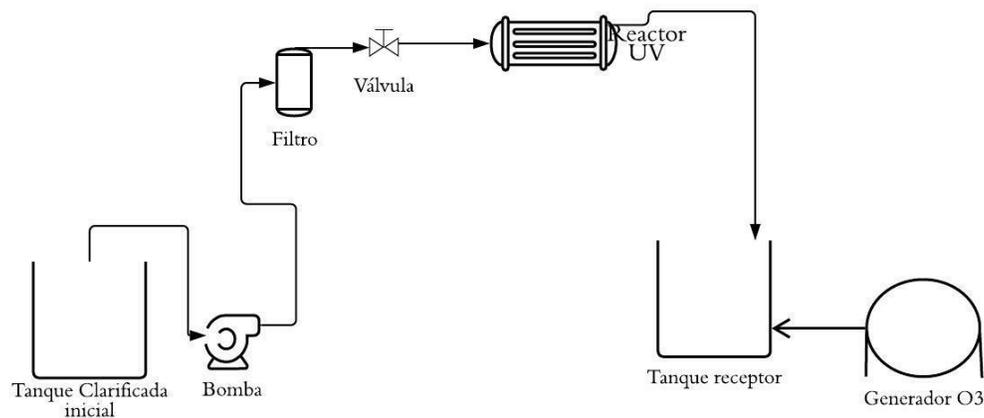


Fig. 11 Diagrama de prueba piloto de desinfección agua clarificada

En el desarrollo de las pruebas se analizaron qué variables se podían manipular para identificar cuáles serían las condiciones apropiadas; las variables seleccionadas fueron:

- ✓ Caudal de agua manipulando la válvula
- ✓ Potencia UV a la que fueron sometidos los microorganismos recirculando el agua a través de la lámpara
- ✓ Concentración de ozono modificando el tiempo de burbujeo

En total, se realizaron cinco pruebas en diferentes días de las cuales se tomaron 14 muestras de agua tratada a diferentes condiciones y un blanco de agua sin tratar en cada una, las condiciones de cada muestra se reportan en la tabla II.

TABLA II. CONDICIONES DE LAS MUESTRAS TRATADAS

# Muestra	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Volumen (m <sup>3</sup> )	T (s)	Potencia UV (W)	Concentración Ozono (mg/L)
1	8,36,E-06	1,00,E-03	1,20,E+02	6	166,42
2	1,07,E-05	1,28,E-03	1,20,E+02	12	130,25
3	9,83,E-06	1,18,E-03	1,20,E+02	18	141,50
4	1,19,E-05	1,42,E-03	1,20,E+02	6	117,19
5	9,15,E-06	1,10,E-03	1,20,E+02	12	151,95
6	9,04,E-06	1,08,E-03	1,20,E+02	18	153,93
7	7,22,E-06	8,66,E-04	1,20,E+02	18	385,11
8	1,31,E-05	1,57,E-03	1,20,E+02	18	106,18
9	1,20,E-05	1,44,E-03	1,20,E+02	18	232,00
10	1,48,E-05	1,77,E-03	1,20,E+02	18	94,08
11	1,14,E-05	1,37,E-03	1,20,E+02	18	243,80
12	7,33,E-06	8,79,E-04	1,20,E+02	18	379,36
13	6,74,E-06	8,08,E-04	1,20,E+02	6	618,66
14	6,39,E-06	7,66,E-04	1,20,E+02	18	652,69

Para cada una de las muestras se realizó conteo de bacterias y se evaluó presencia o ausencia de hongos, los resultados obtenidos se reportan en la tabla III.

TABLA III. EVALUACIÓN DE MICROORGANISMOS

# Muestra	Bacterias (UFC/mL)	Hongos
1	>300	Presencia
2	<1	Presencia
3	2	Presencia
4	15	Presencia
5	2	Presencia
6	<1	Presencia
7	148	Presencia
8	58	Ausencia
9	63	Ausencia
10	>300	Ausencia
11	>300	Ausencia
12	139	Presencia
13	24	Presencia
14	30	Ausencia

En las Figura 12 y 13 se presentan los comportamientos del conteo de bacterias según el tratamiento, se observa que la combinación de los valores más altos simultáneamente de radiación ultravioleta y concentración de ozono contribuyen a una menor formación de bacterias y la eliminación de hongos.

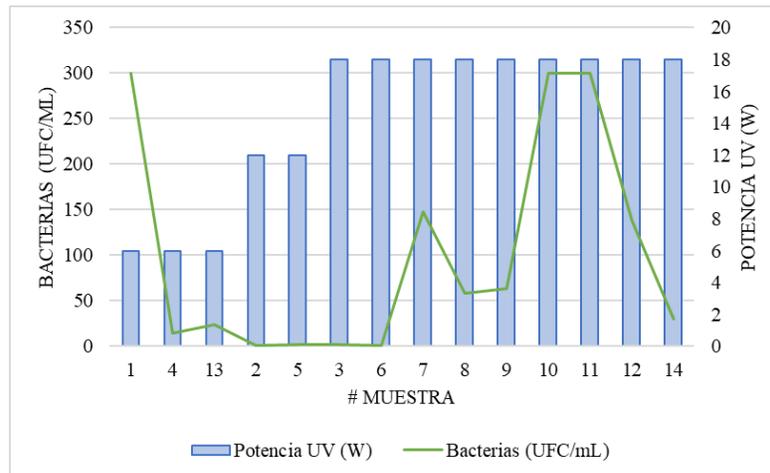


Fig. 12 Comportamiento de cantidad de bacterias según la potencia UV

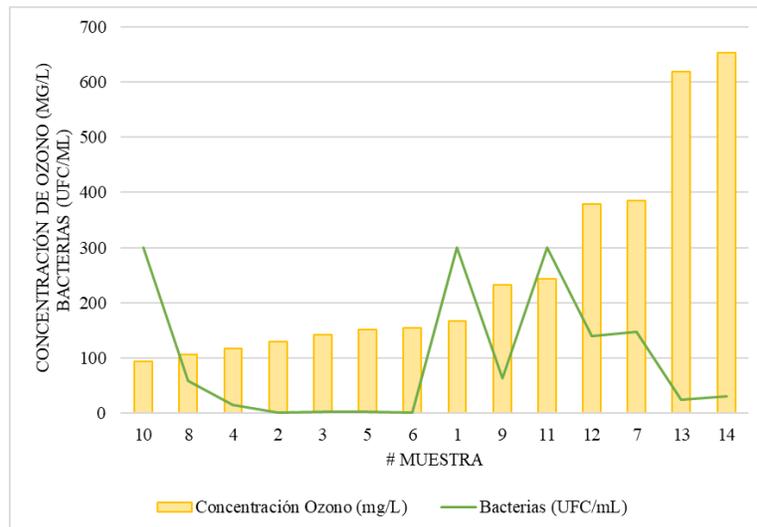


Fig. 13 Comportamiento de cantidad de bacterias según la concentración de ozono

En las tablas IV, V y VI se encuentran los registros fotográficos de los cultivos:

TABLA IV. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBA 1

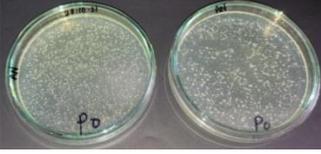
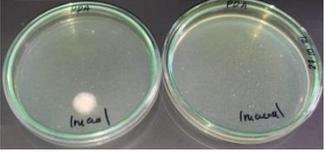
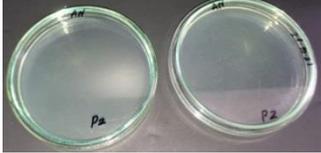
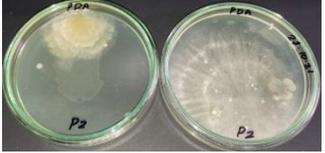
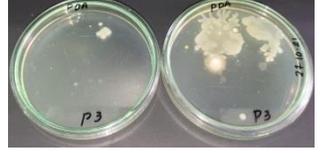
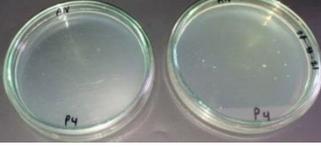
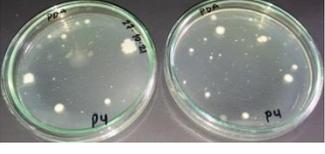
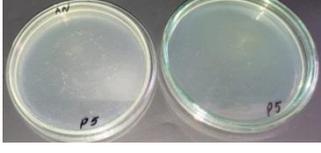
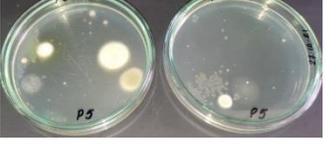
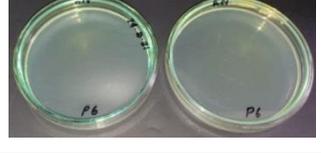
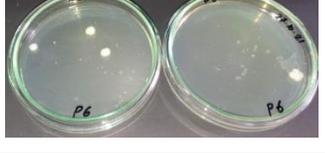
# Muestra	Bacterias	Hongos
<b>Blanco prueba 1</b>		
1		
2		
3		
4		
5		
6		

TABLA V. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBAS 2 Y 3

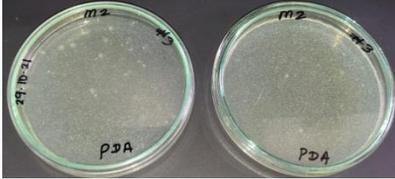
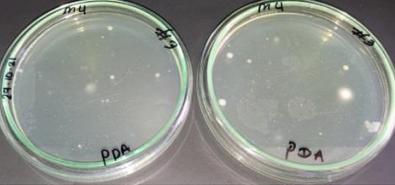
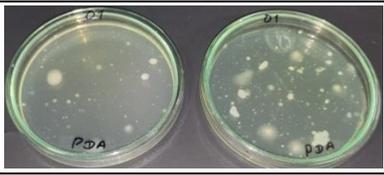
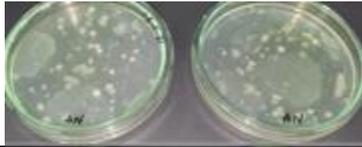
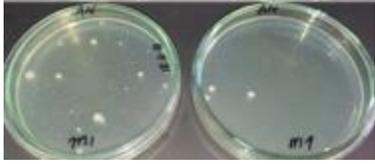
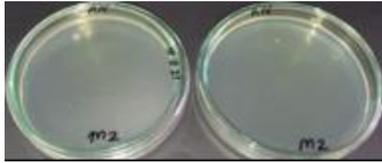
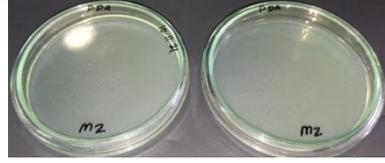
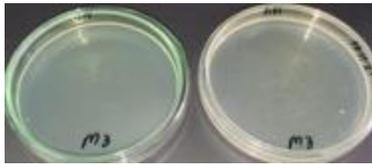
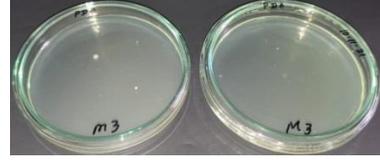
#Muestra	Bacterias	Hongos
Blanco prueba 2		
7		
Blanco prueba 3		
8		
9		

TABLA VI. REGISTRO FOTOGRÁFICO PRUEBA 4

# Muestra	Bacterias	Hongos
<b>Blanco prueba 4</b>		
<b>10</b>		
<b>11</b>		
<b>Blanco prueba 5</b>		
<b>12</b>		
<b>13</b>		
<b>14</b>		

El blanco de la prueba 1 confirmó que el agua sin tratamiento presenta una alta carga de microorganismos, la muestra 1 presentó crecimiento bacteriano elevado indicando que las condiciones del tratamiento que recibió no fueron adecuadas. Las muestras 3,4 y 5 presentaron un leve crecimiento bacteriano, indicando reducción significativa en la concentración bacteriana. Las muestras 2 y 6 que no presentaron crecimiento bacteriano dando un indicio de que la apertura de la válvula no afectaba la desinfección, lo cual se confirmó al calcular el tiempo espacial que fue idéntico con un valor de 120 s en todas las muestras tratadas. Debido a que todas las muestras presentaron crecimiento de hongos se confirmó el hecho de que estos son los que mayor resistencia presentan a las tecnologías utilizadas [9].

En las pruebas 2 y 3 todas las muestras presentaron crecimiento bacteriano, lo que mostró una variabilidad en la resistencia que pueden presentar los tipos de bacterias presentes en el agua clarificada. En la prueba 2 no se pudo evaluar la efectividad en hongos debido a la ausencia en la muestra blanco, para la 3 no se lograron eliminar.

En la prueba 4 todas las muestras presentaron elevado crecimiento bacteriano, las muestras 1 y 2 no presentaron crecimiento de hongos. Por lo anterior se pudo concluir que la carga inicial de microorganismos es muy variable importante que afecta directamente la efectividad de la desinfección.

En la prueba 5 se logró una disminución considerable respecto a la carga inicial bacteriana en las muestras 12, 13 y 14, se logró eliminar los hongos en la muestra 14. Lo anterior indica que las condiciones de esta última pueden ser condiciones apropiadas para la desinfección.

Desde la prueba 2 se implementó un difusor de gas cuya función fue disminuir el tamaño de las burbujas de ozono lo que permitía tener una mayor área de contacto entre el gas y líquido y aumentar el tiempo de residencia de las burbujas, contribuyendo a una mayor eficiencia del mecanismo de desinfección. En las figuras 14 y 15 se muestra la comparación entre las burbujas con difusor y sin este:

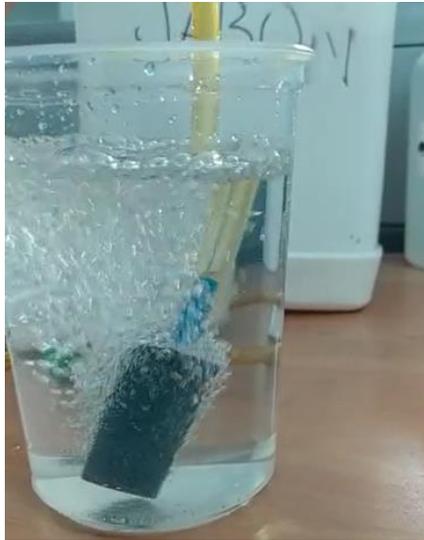


Fig. 14 Burbujas de ozono con difusor



Fig. 15 Burbujas de ozono sin difusor

*E. Evaluación de resultados de desinfección con las tecnologías para posible implementación a gran escala*

A pesar de la variabilidad entre las pruebas la atención se enfocó en que las tecnologías evaluadas lograron desinfectar el agua y con el diseño de equipos adecuados se puede lograr la recirculación del agua al proceso de lavados e incluso al área de producción. En este caso, las condiciones de la prueba 5 serían el punto de partida para diseñar el proceso.

Luego de la aprobación del método para desinfectar se inició la definición de necesidades para implementar el tratamiento como, por ejemplo, determinar las características fisicoquímicas del agua a tratar y su posterior a tratamiento; como la dureza, pH, DQO, sólidos suspendidos, entre otros. Los parámetros a analizar se eligieron según el estándar que debe tener el agua para producir pintura y el agua de lavado se analizó desde el punto de vista de evitar el deterioro de la tubería por incrustamiento.

El caudal de diseño es de  $25 \text{ m}^3/\text{día}$  el cual se definió analizando la proyección de la generación de vertimientos de la planta para el año 2030 así como el historial de fluctuaciones del agua clarificada (Fig. 16).

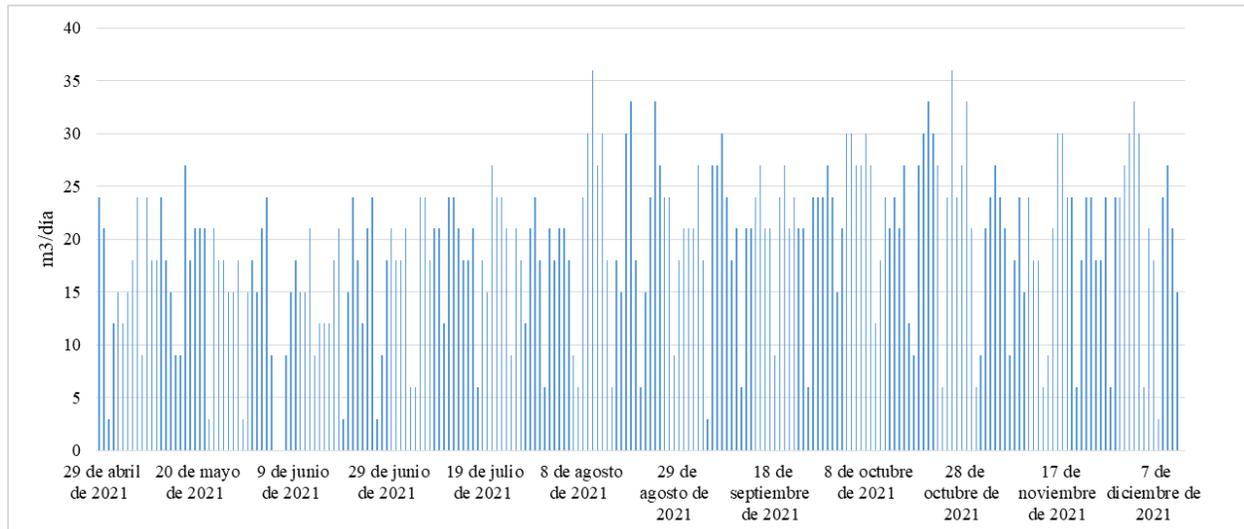


Fig. 16 Historial de generación de agua clarificada por días

De acuerdo con los registros de agua, en producto y en lavados se consumen en promedio  $55$  y  $25 \text{ m}^3/\text{día}$  respectivamente de agua potable, por lo que si se logra implementar exitosamente el proceso de desinfección para reutilizar el agua se podrían eliminar los vertimientos de agua residual casi en su totalidad, adicionalmente se reduciría la captación de agua potable aportando en gran medida a las operaciones sostenibles de la planta.

Con el caudal y las características fisicoquímicas se seleccionaron proveedores que pudieran generar propuestas que cumplieran las necesidades del agua a reutilizar. Algunas de las propuestas

técnico-económicas recibidas se muestran a continuación con el detalle permitido por la confidencialidad entre los proveedores y cliente:

### *Propuesta Synertech*

Consiste en un sistema compacto de 1.5 m alto x 1.5 m ancho x 1 m largo, que integra el tratamiento fisicoquímico con los procesos de oxidación avanzada. El sistema propuesto fue diseñado por el proveedor para agua residual del sector de pinturas y barnices, por lo que no se necesitarían procesos de floculación y sedimentación. La adición de peróxido mejora la formación de radicales hidroxilos, que permiten degradar con mayor eficiencia la materia orgánica.

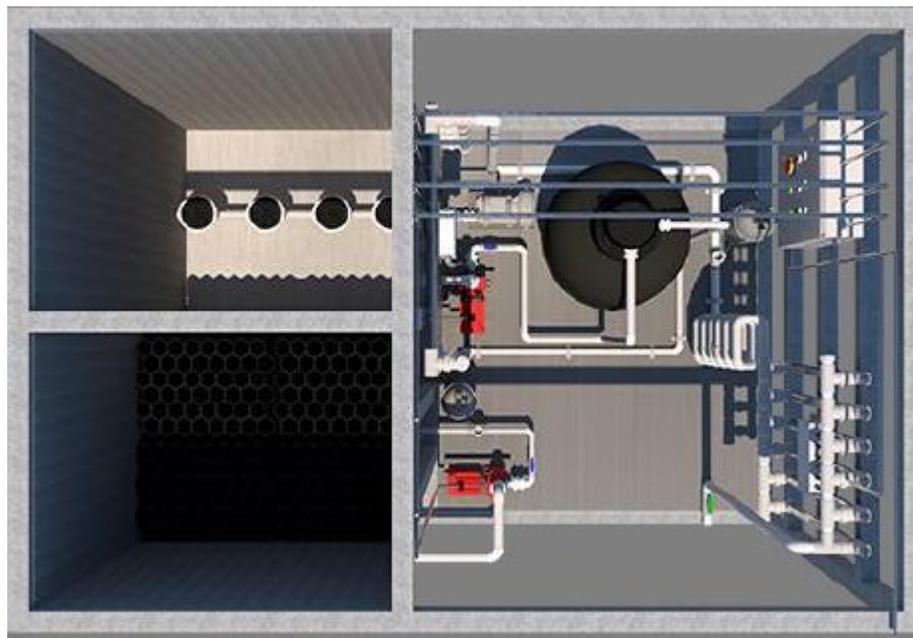
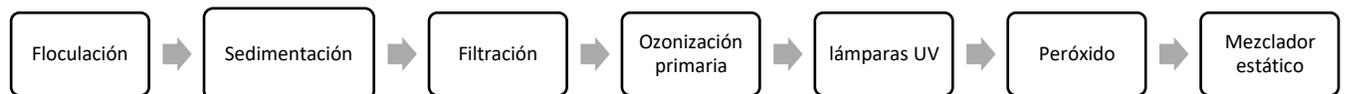


Fig. 17 Planta de oxidación avanzada Synertech

### *Propuesta GAIA*

Se compone de un tanque de 3 m<sup>3</sup> en el que se da simultáneamente la radiación con ultravioleta y el contacto con ozono, representa ventajas respecto a que el tanque de contacto puede ser el mismo tanque para almacenar el agua tratada.

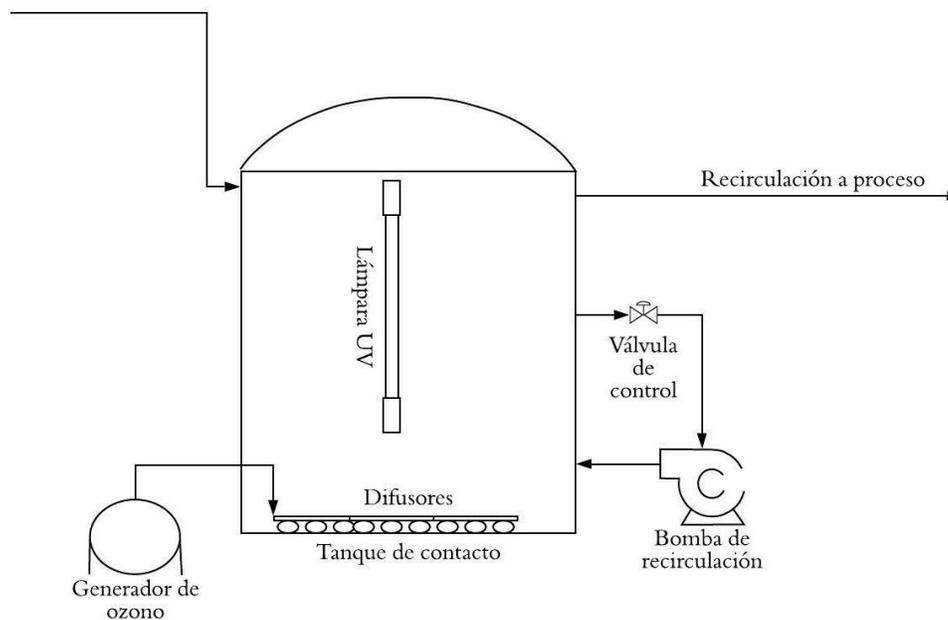


Fig. 18 Sistema de ozono y ultravioleta propuesto por GAIA

### *Propuesta Novaqua*

Se propuso un sistema de torre de contacto con ozono, un filtro de oxidación catalítica y una torre de lecho empacada para la retención de algunas partículas y fibras generadas en estos procesos. En esta propuesta se descartó el sistema ultravioleta al considerar más eficiente la oxidación catalítica y se incluyó una torre de micro filtración buscando eliminar el riesgo de incrustamiento en tuberías.

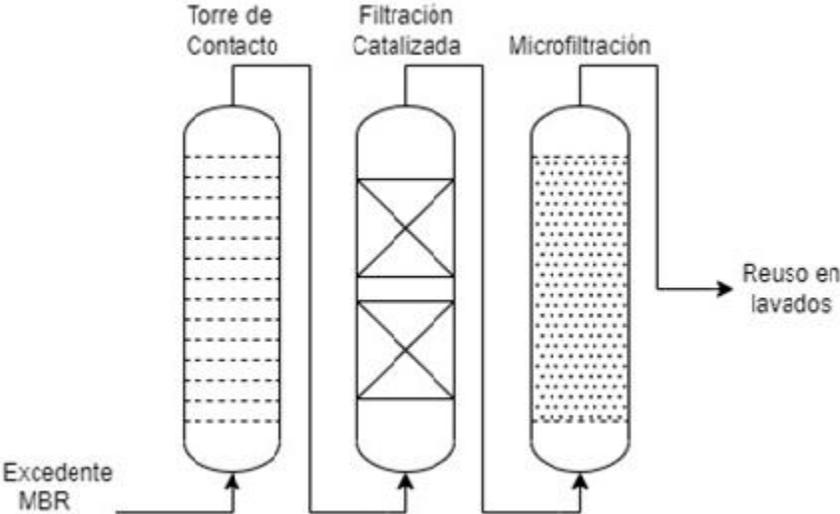


Fig. 19 Sistema de tratamiento propuesto por Novaqua

## VI. CONCLUSIONES

- Según los registros de agua consumida en la planta se estimó que el 25% del agua es utilizada en lavados, la cual disminuyó según el indicador de vertimientos manteniendo una tendencia a la baja. Se pudo concluir que las herramientas de ahorro y el seguimiento realizado contribuyeron a la disminución del consumo de agua.
- La actualización del estándar de lavados permitió reducir la variabilidad de los consumos en cada lavado gracias a las diferencias de cantidades entre colores, obteniéndose mayor claridad en el método de lavado y generando conciencia sobre limitar el uso del agua a niveles mínimos.
- Las pruebas de desinfección permitieron la eliminación de hongos y una disminución del 90% de carga bacteriana con una potencia de radiación UV de 18 W y concentración de ozono de 652.69 mg/L, además se evidenció que el caudal no afectaba los resultados.
- Se encontró que hay viabilidad técnica por algún licenciate de tecnología para implementar el tratamiento propuesto, en algunos casos tratamientos adicionales dan mayor garantía a la calidad del agua tratada.
- La implementación del proceso de desinfección para reutilizar el agua, podría reducir los vertimientos de agua residual casi en su totalidad con un caudal de diseño de 25 m<sup>3</sup>/día de agua clarificada.

## REFERENCIAS

- [1] «Hitos significativos en la historia: Pintuco,» [En línea]. Available: <https://www.pintuco.com.co/sobre-pintuco/nuestra-historia>.
- [2] M. d. A. y. D. Sostenible, «Red de desarrollo sostenible,» 17 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos>. [Último acceso: 2021].
- [3] N. K. Surya, M. Basavaraju y A. Adani, «Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges,» *Journal of Environmental Management*, vol. 296, 2021.
- [4] D. B.K, H. M.A, H. S y G. B.Sen, «Microfiltration of water-based paint effluents,» *Advances in Environmental Research*, vol. 8, pp. 455-466, 2004.
- [5] Velolia water technologies, «Clarification Water Treatment,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.veoliawatertechnologies.co.uk/technologies/clarification>.
- [6] A. Rodríguez, «La desinfección-antiseptia y esterilización en instituciones de salud. Atención primaria,» *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 2006.
- [7] C. Rodríguez y G. Coy, «DEMANDA QUÌMICA DE OXÌGENO POR REFLUJO CERRADO Y VOLUMETRÌA,» 28 Diciembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>.
- [8] M. & Eddy, A. Company, Asano, Takashi, F. Burton y H. Leverenz, *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*, Mc Graw Hill, 2007.
- [9] M. Sameena N, G. Prakash C, V. Atul N y M. Sandeep N, «Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: Principles and applications: A review,» *Journal of Water Process Engineering*, vol. 35, 2020.
- [10] M. BATALLER, L. A. FERNÁNDEZ y E. VÉLIZ, «EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD DEL EMPLEO DEL OZONO EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,» *Int Contam Ambient*, pp. 85-95, 2010.

[11] L. C. Palacios Acero, Ingeniería de métodos movimientos y tiempos, Pereira: Ecoediciones, 2018.

[12] E. Pietrobon, «Desinfección por Luz Ultravioleta,» *ACADEMIA*.

[13] C. Toledo, «Ingeniería y soluciones ambientales,» 2021. [En línea]. Available: <https://isa.ec/desinfeccion-mediante-luz-ultravioleta-cloro-y-ozono/>.