

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Evolución del potencial de óxido-reducción para predecir la
eficiencia de ozonización de coliformes termotolerantes en
efluentes terciarios en una planta de tratamiento de aguas
residuales

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Química
presenta:

Oscar Ricardo Alayo Atoche

Asesor:

Dr. Maynard Jorge Kong Moreno

Lima, 2023


Informe de Similitud

Yo, Maynard Jorge Kong Moreno, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado: *Evolución del potencial de óxido-reducción para predecir la eficiencia de ozonización de coliformes termotolerantes en efluentes terciarios en una planta de tratamiento de aguas residuales*, del autor Oscar Ricardo Alayo Atoche, siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de .14.%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el .12/12/2023
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 12 de diciembre de 2023.

.....

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Kong Moreno Maynard Jorge	
DNI: 06391106	Firma 
ORCID: 0000-0001-5789-3063	

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este trabajo de manera especial a mi amada esposa Ily, por su apoyo incondicional, por siempre creer y sacar lo mejor de mí, y también a mis lindos hijos: Joaquín, Gabriel y Valeria, que son la fuerza en mi vida.

Dedicárselo también a mis padres, a mis suegros, a mis hermanos y cuñados, a toda mi Familia, que siempre me brinda su apoyo incondicional.



AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento especial al Dr. Maynard Kong Moreno, mi asesor de tesis, por haberme dado la oportunidad de realizar esta investigación y brindarme todo su apoyo para culminar mi trabajo de tesis.

También quiero agradecer al Dr. Javier Sotomayor Moriano, y al Dr. Gustavo Pérez Zúñiga, por haberme dado la oportunidad de participar del Equipo de Investigación Multidisciplinario del Proyecto PI0764-2021 del Vicerrectorado de Investigación PUCP.

A buenos compañeros que conocí durante la realización de la investigación: Juan de Dios Segura y Edwin Ávila.

Gracias también a Gilmer Barrantes, Ana Farfán, David Cuya, por siempre ayudarme con toda la logística necesaria para la realización de la investigación.

Y finalmente un agradecimiento especial a Don Pedro Mendoza, técnico responsable de la PTAR de SEDAPAL, que siempre me brindó su ayuda y amistad para poder llevar a cabo las pruebas en la planta piloto ubicada en Cieneguilla.

RESUMEN

En esta investigación se analiza la evolución del potencial de oxidación-reducción (ORP) y parámetros fisicoquímicos como oxígeno disuelto, pH, turbidez, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica, entre otros, con el fin de predecir la calidad de aguas residuales *in situ*, durante un proceso de desinfección con ozono, relacionándolos con parámetros microbiológicos como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), así como el contenido de coliformes totales y coliformes termotolerantes. Estos estudios se realizaron sobre efluentes terciarios de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de SEDAPAL en Cieneguilla (Lima, Perú).

Dentro de este proceso de ozonización, los resultados del ORP muestran un comportamiento particular frente al contenido de coliformes termotolerantes. Se propone un modelo matemático para correlacionar el ORP con el contenido de coliformes termotolerantes (actividad microbiana), logrando un enfoque semicuantitativo. Estas mediciones de ORP podrían utilizarse como indicador *in situ* para predecir la calidad de las aguas residuales tratadas con ozono.

En condiciones de dosis de ozono de 13.33 mg/L y después de 30 minutos de ozonización, el ORP aumenta consistentemente por encima de 390 mV, logrando así valores aceptables para el contenido de coliformes termotolerantes dentro de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos para efluentes en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (según el Ministerio del Ambiente de Perú), incluso para muestras iniciales de hasta 5.400.000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes antes de que comience el proceso de desinfección.

ABSTRACT

In this research, the evolution of the oxidation-reduction potential (ORP) and physicochemical parameters such as dissolved oxygen, pH, turbidity, total dissolved solids, electrolytic conductivity, among others, is analyzed with the purpose of predicting the quality of wastewater *in situ* during a disinfection process with ozone, relating them to microbiological parameters such as biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), as well as the content of total coliforms and thermotolerant coliforms. These studies were performed on tertiary effluents in the wastewater treatment plant (WWTP) of SEDAPAL in Cieneguilla (Lima, Peru).

Within this ozonation process, the ORP results show a particular behavior against the content of thermotolerant coliforms. A mathematical model is proposed to correlate ORP with the content of thermotolerant coliforms (microbial activity), achieving a semiquantitative approach. These ORP measurements could be used as an *in situ* indicator to predict the quality of wastewater treated with ozone.

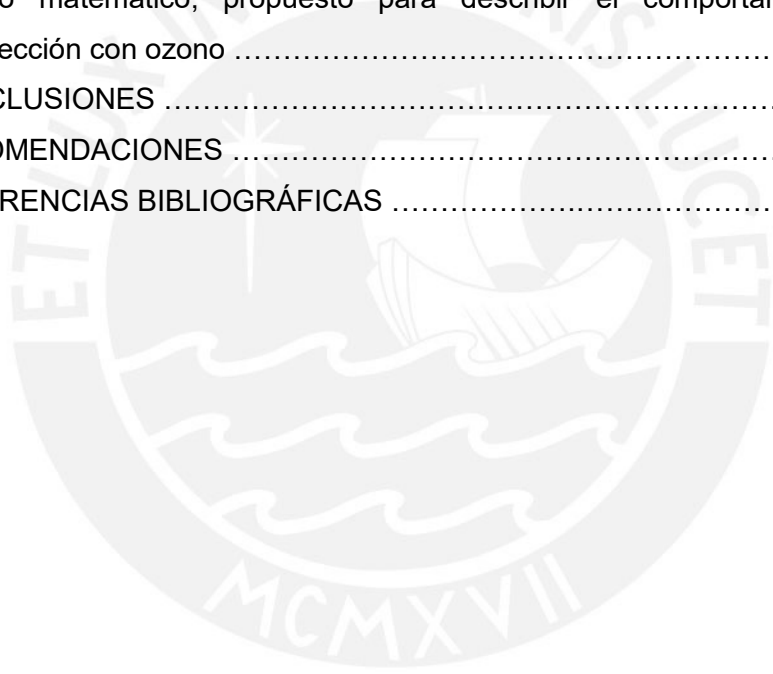
At ozone dose conditions of 13.33 mg/L and after 30 minutes of ozonation, the ORP consistently rises above 390 mV, achieving thereby acceptable values for the content of thermotolerant coliforms within the maximum permissible limits (MPL) set for effluents of domestic or municipal wastewater treatment plants (according to the Ministry of Environment in Peru), even for initial samples as high as 5,400,000 NMP/100 mL of thermotolerant coliforms before the disinfection process begins.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	Objetivo general	3
2.2.	Objetivos específicos	3
3.	MARCO TEÓRICO	4
3.1.	Conceptos generales	4
3.1.1	Calidad del agua	4
3.1.2	Aguas residuales	6
3.1.3	Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales	8
3.1.4	Bacterias en aguas residuales	9
3.1.5	Potencial de oxidación reducción	14
3.1.6	Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda	15
3.1.7	Desinfección con ozono	16
3.1.8	Generación de ozono	17
4.	METODOLOGÍA	19
4.1.	Descripción de la Planta de desinfección de ozono	19
4.2.	Parámetros y equipos utilizados en el monitoreo in situ	23
4.3.	Parámetros fisicoquímicos	23
4.3.1.	Oxígeno disuelto (OD)	23
4.3.2.	Rango pH de acidez	24
4.3.3.	Conductividad eléctrica (CE)	24
4.3.4.	Temperatura	24
4.3.5.	Sólidos totales disueltos (TDS)	25
4.3.6.	Salinidad	25
4.3.7.	Turbidez	25
4.4.	Equipos utilizados en las mediciones	26
4.4.1.	Multiparámetro para medir pH, conductividad y oxígeno disuelto 86031	26
4.4.2.	Pocket Colorimeter DR300, ozono	26
4.4.3.	Turbidímetro Lovibond® Water Testing Tintometer® Group	27

4.5.	Ensayos realizados en Laboratorio	28
4.5.1.	Sólidos Totales en suspensión (TSS)	28
4.5.2.	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	29
4.5.3.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})	29
4.5.4.	Coliformes totales	30
4.5.5.	Coliformes termotolerantes	30
5.	RESULTADOS	31
5.1.	Proceso de ozonización de agua potable en condiciones "batch" (sin flujo)	31
5.1.1	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i>	31
5.1.2	Estudio de la evolución de ozono libre medidos <i>in situ</i>	37
5.2.	Proceso de ozonización de agua residual en condiciones "batch" (sin flujo)	40
5.2.1	Estudio de la evolución de parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i>	40
5.2.2	Estudio de la evolución de ozono libre medidos <i>in situ</i>	42
5.2.3	Estudio de la evolución de la turbidez (in situ)	44
5.2.4	Estudio de la evolución de los coliformes totales y termotolerantes	47
5.3.	Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo, aplicando dosis variables de ozono	50
5.3.1	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i> y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes	50
5.4.	Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo, aplicando dosis fija de ozono	53
5.4.1	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i> y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes	53
5.5.	Resultados de medición de SST, DQO, DBO y contenido de coliformes termotolerantes en muestras ozonizadas del agua residual	56
5.6.	Propuesta de un modelo matemático, que describa el comportamiento de la desinfección con ozono, para un monitoreo <i>in situ</i>	61
6.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	67
6.1.	Proceso de ozonización de agua potable en condiciones "batch" (sin flujo)	67
6.1.1	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i>	67
6.1.2	Estudio de la evolución de ozono libre medidos <i>in situ</i>	68
6.2.	Proceso de ozonización de agua residual en condiciones "batch" (sin flujo)	68
6.2.1	Estudio de la evolución de parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i>	68
6.2.2	Estudio de la evolución del ozono libre medido <i>in situ</i> , durante la ozonización de agua residual, en condiciones "batch" (sin flujo)	69

6.2.3	Estudio de la evolución de la Turbidez (in situ), durante la ozonización de agua residual, en condiciones "batch" (sin flujo)	70
6.2.4	Estudio de la evolución de los coliformes totales y termotolerantes, durante la ozonización de agua residual, en condiciones "batch" (sin flujo)	71
6.3.	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes, durante la ozonización de agua residual, en condiciones de flujo, aplicando dosis variables de ozono	73
6.4.	Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo aplicando una dosis fija de ozono	75
6.4.1	Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i> y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes	75
6.5.	Discusión de los resultados de medición de SST, DQO, DBO y contenido de coliformes termotolerantes en muestras ozonizadas del agua residual	78
6.6.	Modelo matemático, propuesto para describir el comportamiento de la desinfección con ozono	79
7.	CONCLUSIONES	80
8.	RECOMENDACIONES	81
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Etapas y procesos para el tratamiento de aguas residuales en la PTAR Cieneguilla – Sedapal	9
Figura 2: Diagrama de la pared celular Gram positiva. Tomado de Lucini et al, 2020 [22].	10
Figura 3: Diagrama de la pared celular Gram negativa. Tomado de Madigan et al, 2015 [33]	11
Figura 4: Diagrama de una endóspora. Tomado de Madigan et al, 2015 [33].	13
Figura 5: Ácido dipicolínico, Complejo formado con calcio (DPA). Tomado de Madigan et al, 2015 [33].	14
Figura 6: Reacciones oxidación y reducción del agua [34].	14
Figura 7: Resonancia en la molécula de ozono. Tomado de Losada et al, 1999 [35]	16
Figura 8: Esquema del efecto corona. Tomado de Top Ozono, Tecnología para crear ozono, blogs 2023 [31]	18
Figura 9: Diagrama de elaboración propia de la planta de ozono diseñada durante el proyecto de tesis	19
Figura 10: Generador de ozono de la marca OZONOTEC	20
Figura 11: Representación esquemática de elaboración propia, de la reacción del ozono con el agua residual en el tanque.....	21
Figura 12: Fotografía tomada del Tablero de control de la planta de desinfección con ozono	22
Figura 13: Fotografía tomada de las instalaciones de la planta de desinfección con ozono utilizada durante el proyecto de investigación	22
Figura 14: Multiparámetro para medir pH, conductividad y oxígeno disuelto 86031	26
Figura 15: Fotómetro Pocket Colorimeter DR300 para medir ozono disuelto en agua	27

Figura 16: Lovibond® Water Testing Tintometer® Group	27
Figura 17: Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 20 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos	32
Figura 18: Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 20 g/h de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.	33
Figura 19: Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 30 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.	35
Figura 20: Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 30 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.	36
Figura 21: Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.	38
Figura 22: Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.....	39
Figura 23: Evolución de la Turbidez (NTU) durante la ozonización a 40 g/h, a condiciones “batch” (sin flujo) durante 90 minutos	46
Figura 24: Remoción de la turbidez (%) al ozonizar a 40 g/h a condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.....	47
Figura 25: Estimación en función del tiempo, t(min), del contenido de contaminantes oxidados (mg/L) mediante la ozonización	64
Figura 26: Estimación durante la ozonización de la demanda química de oxígeno, DQO (mg/L) respecto a los valores medidos de ORP(interno) (mV)	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Criterios de la calidad de agua	6
Tabla 2:	Límites máximos permisibles para efluentes de PTAR. MINAM [26]	15
Tabla 3:	Parámetros controlados y equipos utilizados, rangos de detección	23
Tabla 4:	Lista de ensayos realizados en Laboratorio SGS	28
Tabla 5:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 20 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos	31
Tabla 6:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 30 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos	34
Tabla 7:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos	37
Tabla 8:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 30 g/h, de agua potable bajo condiciones “batch”(sin flujo) por un periodo de 60 minutos	40
Tabla 9:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 40 g/h, de agua potable bajo condiciones “batch“ (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.	41
Tabla 10:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h de agua residual, a condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 120 minutos	42
Tabla 11:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 20 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 120 minutos	43
Tabla 12:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 30 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 60 minutos	43
Tabla 13:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 40 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) para un periodo de 60 minutos	44
Tabla 14:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h del agua residual (monitoreo de la evolución de la turbidez) durante un periodo de 90 minutos.....	45

Tabla 15:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h del agua residual (monitoreo de la evolución de la turbidez) durante un periodo de 90 minutos	46
Tabla 16:	Evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes aplicando una ozonización de 40 g/h por un periodo de 120 minutos	48
Tabla 17:	Evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes aplicando una ozonización de 40 g/h durante 30 minutos	49
Tabla 18:	Porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes (CTT) en una ozonización a 40 g/h. en periodos de 30 y 120 minutos	50
Tabla 19:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, en una ozonización variable a un flujo de efluente de 45 L/min por un periodo de 150 minutos.....	51
Tabla 20:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, en una ozonización variable a un flujo de efluente de 50 L/min.....	52
Tabla 21:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 30 L/min por un periodo de 60 minutos	54
Tabla 22:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 40 L/min por un periodo de 70 minutos	55
Tabla 23:	Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 50 L/min durante un periodo de 70 minutos	56
Tabla 24:	SST, DQO, DBO y CTT de las aguas residuales que ingresan a la planta de tratamiento	57
Tabla 25:	Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para la ozonización a 40 g/h durante 30 min, sin flujo, de los ensayos registrados en la Tabla 17. (Laboratorios SGS)	57
Tabla 26:	Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 150 minutos de ozonización (a 12, 24 y 40 g/h) en agua residual a un flujo de 45 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 19. (Laboratorios SGS)	58
Tabla 27:	Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 150 minutos de ozonización (a 12, 24 y 40 g/h) en agua residual a un flujo de 50 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 20. (Laboratorios SGS)	59
Tabla 28:	Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 22.22 mg/L en agua residual a un flujo de	

30 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 21. (Laboratorios SGS)	60
Tabla 29: Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 16.67 mg/L en agua residual a un flujo de 40 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 22. (Laboratorios SGS)	60
Tabla 30: Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 13.33 mg/L en agua residual a un flujo de 50 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 23. (Laboratorios SGS).	61
Tabla 31: Estimación en el tiempo del contenido de contaminantes oxidados y de la demanda química de oxígeno del agua residual tratada a una ozonización de 40 g/h, bajo condiciones batch (sin flujo)	63



LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ADN	Ácido desoxirribonucleico
AOPs	Advanced oxidation procedures (Procesos de Oxidación Avanzada)
CE	Conductividad electrolítica
CTT	Coliformes termotolerantes
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DPA	Ácido dipicolínico
DQO	Demanda química de oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
LMP	Límite máximos permitidos
LPS	Lipopolisacárido
MINAM	Ministerio del Ambiente
NMP	Most probable number (El método del número más probable)
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unidad de turbidez nefelométrica)
OD	Oxígeno disuelto
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
ORP	Oxidation-reduction potential (Potencial de óxido-reducción)
PLC	Programmer Logic Controller (Controlador lógico programable)
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual

PUCP	Pontificia Universidad Católica del Perú
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
TDS	Total suspend solids (Sólidos totales disueltos)
TOC	Total organic carbón (Carbono orgánico total)
TSS	Total suspend solids (Sólidos totales suspendidos)
USDANRCS	United States Department Agriculture, Natural Resources Conservation Services (Departamento de Agricultura de Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales)



1. INTRODUCCIÓN

En los efluentes de las estaciones de tratamiento de aguas residuales domésticas, luego de los tratamientos primarios, todavía hay presente una gran cantidad de microcontaminantes (residuos farmacéuticos, productos de higiene humana, bacterias, entre otros) a concentraciones muy bajas, y estos son perjudiciales para la vida acuática y el ser humano. Por tal motivo, el proceso de tratamiento requiere de alguna acción posterior para la eliminación de estos microcontaminantes de los efluentes de las aguas residuales. El proceso de ozonización en los efluentes es una de las soluciones más prometedoras y eficaces para eliminar los contaminantes aún presentes luego de esta etapa primaria en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) [1].

La optimización del proceso de desinfección está en relación a dos factores importantes: las características del agua y las propiedades del desinfectante [2,3].

En relación a las características del agua [2]., es necesario tomar en cuenta:

- 1) las variables fisicoquímicas de pH y temperatura,
- 2) el tipo de microorganismos que contiene el agua a tratar y
- 3) la presencia de materia orgánica.

Entre los agentes oxidantes más utilizados para el tratamiento de agua podemos mencionar el cloro, dióxido de cloro, cloraminas, permanganato potásico, ozono y radicales hidroxilos. La molécula de ozono es un oxidante fuerte y agente eficaz que puede destruir microorganismos. Se comprobó la reducción de la población microbiana y la eficacia del uso de ozono [3].

El ozono es una sustancia química que, debido a sus propiedades fisicoquímicas se considera un compuesto ecológicamente amigable al medio ambiente. Una de las características del ozono es la capacidad que tiene como agente oxidante fuerte. El ozono es inestable y, según las condiciones ambientales, se descompone fácilmente en oxígeno diatómico (O_2) con un tiempo de vida media ($t_{1/2}$) de 20 a 90 minutos.

Para controlar la calidad del agua tratada se requiere evaluar parámetros biológicos muy importantes tales como el contenido de coliformes totales y termotolerantes, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO).

Sin embargo, se tiene la desventaja que dichos ensayos son costosos, deben realizarse en laboratorios especialmente acondicionados que generalmente no están disponibles en las PTARs y, sobre todo, los resultados de los análisis no se encuentran disponibles de manera inmediata lo que no permite realizar alguna acción correctiva en el proceso de tratamiento del agua de ser el caso. Debido a esto, se buscó una alternativa de análisis *in situ* que permita controlar la calidad del agua de manera inmediata.

Ante la pregunta de cómo garantizar la calidad del agua tratada con ozono, mediante mediciones fisicoquímicas y acciones de control rápidas e *in situ*, se planteó la posibilidad de monitorear la evolución del potencial de oxidación-reducción (ORP) en el tiempo durante su proceso de ozonización del efluente.

La medición del potencial ORP como un método alternativo para el control bacteriológico del agua, es factible y nos brinda la ventaja de proporcionarnos valores en tiempo real, los que nos permiten tomar decisiones inmediatas durante el tratamiento.

El potencial ORP es uno de los indicadores más complejos del estado fisiológico de los cultivos microbianos y su medición podría ser una herramienta útil para la determinación cualitativa y cuantitativa de la contaminación microbiana, en vista que, durante el crecimiento bacteriano, el potencial ORP del medio disminuye **[4]**.

El ORP se utiliza como una medida efectiva de la actividad de saneamiento en el agua potable, piscinas y balnearios. Los electrodos de medición ORP fueron estudiados en la Universidad de Harvard en 1936. Estos estudios demostraron una fuerte correlación de ORP y la actividad bacteriana **[28]**.

Debido a las propiedades químicas del ozono, este elemento también se ha usado como agente desinfectante para aguas potables, donde se determinó que tiene la capacidad de eliminar algunas bacterias patógenas y virus, aplicando dosis de entre 0.40 mg/L a 0.50 mg/L de ozono **[5][6][7]**.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar y evaluar la evolución de los parámetros fisicoquímicos (potencial de óxido reducción, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, pH, conductividad electrolítica, temperatura, salinidad, turbidez y la cantidad de ozono libre), durante la ozonización de efluentes terciarios de una planta de tratamiento de aguas residuales y determinar la calidad del agua tratada.

2.2. Objetivos específicos

- Relacionar el comportamiento del potencial de óxido-reducción (ORP) respecto al porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes, y determinar la calidad del agua tratada.
- Relacionar la reducción de coliformes termotolerantes respecto a diferentes dosis de ozono en condiciones de flujo de agua residual durante la ozonización en condiciones: "batch" (sin flujo) y con flujo de efluente.
- Analizar la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* (potencial de óxido-reducción, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, pH, conductividad electrolítica, temperatura, salinidad y la cantidad de ozono libre) durante la ozonización de agua residual, en condiciones "batch" (sin flujo) y con flujo del efluente, para determinar el comportamiento de estos durante el tratamiento de desinfección.
- Validar la desinfección del agua residual tratada con ozono respecto a los parámetros fisicoquímicos: sólidos totales disueltos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y contenido de coliformes termotolerantes.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Conceptos generales

3.1.1 Calidad del agua

El agua es el recurso natural más importante del mundo ya que sin ella la vida no puede existir y la mayoría de las industrias no podrían operar. Aunque la vida humana puede existir durante muchos días sin comida, la ausencia de agua durante unos pocos días tiene efectos y consecuencias fatales. La presencia de una fuente de agua segura y confiable es, por lo tanto, un requisito esencial para establecer una comunidad [8].

La calidad del agua se define como un complejo de propiedades químicas, físicas, microbiológicas y radiológicas con respecto a su idoneidad para propósitos particulares [9].

La calidad del agua está influida por factores naturales y la actividad humana; sin embargo, se asocia principalmente con esta última como, por ejemplo: urbanización, crecimiento de la población, desarrollo industrial y el uso excesivo de los recursos naturales [10].

Además, hay dos fuentes principales de contaminación antropogénica; “fuentes puntuales”, que incluyen a la industria y plantas de tratamiento de aguas residuales, y “fuentes no puntuales”, que comprenden a la escorrentía de aguas pluviales agrícolas y urbanas [10].

La composición de las aguas residuales vertidas a los cuerpos de agua es compleja y abarca a los siguientes constituyentes:

- Materia orgánica (pesticidas, hidrocarburos, fenoles, plastificantes, bifenilos, detergentes, solventes, fármacos y carbohidratos);
- Materia inorgánica (metales tóxicos, metales radiactivos, minerales);
- Nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio);
- Microorganismos.

La descarga de nuevos productos químicos en un cuerpo de agua puede alterar los procesos bioquímicos con consecuencias desconocidas.

Los diversos países del mundo han desarrollado una serie de leyes nacionales para proteger la calidad del agua. Dichos estándares contienen regulaciones sobre la concentración máxima permisible de contaminantes en el agua potable. La norma internacional elaborada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), “Pautas para la calidad del agua potable”, puede complementar tales políticas nacionales [11].

La contaminación de los ecosistemas es una problemática que se presenta en la actualidad, debido al vertimiento de desechos domésticos e industriales que constituyen una fuente de deterioro del medio ambiente. El control de la calidad microbiológica del agua de consumo requiere de análisis dirigidos a determinar la presencia de microorganismos patógenos. Entre los indicadores más utilizados se encuentran los contenidos de coliformes totales y termotolerantes [12].

A nivel nacional, los estándares de calidad del agua son establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), mientras que a nivel internacional son establecidos por organismos tales como la Food and Agriculture Organization (FAO), Environmental Protection Agency (EPA), United States Department Agriculture Natural Resources Conservation Services (USDANRCS), etc.

La evaluación de la calidad del agua puede realizarse midiendo parámetros físicos (turbidez, sólidos totales, etc.), químicos (pH, cloruros, nitratos, etc.) o biológicos (contenido de coliformes totales y termotolerantes, etc.).

En la Tabla 1, se presentan un consolidado de los criterios de calidad del agua para riego según diferentes organismos.

Tabla 1. Criterios de la calidad de agua

Parámetros	Unidad	Valor ECA de aguas Categoría – III ^a	Valores del EPA del contenido máximo permisible	Valores dados para agua de riego (USDANRCS) ^c	Recomendaciones de concentraciones máximas para agua de riego (FAO) ^d
Bicarbonatos	mg/L	370	-	-	-
Calcio	mg/L	200	-	-	-
Carbonatos	mg/L	5	-	-	-
Cloruros	mg/L	100 – 700	250	-	-
Conductividad electrolítica	µS/cm	<2000	-	2500	-
Demanda química de oxígeno	mg/L	<15	-	-	-
Fosfatos	mg/L	1	-	-	-
Nitratos	mg/L	10	10	-	-
Oxígeno disuelto	mg/L	>5	-	-	-
pH	Unidades de pH	6.5 – 8.4	6.5 – 8.5	4.5 – 9.0	
Sodio	mg/L	200	-	-	-
Sulfatos	mg/L	300	250	-	-
Aluminio	mg/L	5	0.05 - 2	1	5
Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.005	0.01
Cobre	mg/L	0.2	1.3	0.2	0.2
Hierro	mg/L	1	0.3	-	5
Magnesio	mg/L	150	-	-	-
Plomo	mg/L	0.05	0.015	5	5
Zinc	mg/L	2	5	2	2

a. Ley General del Ambiente, Ley N°28611, Decreto Supremo N°002-2008 MINAN [13].

b. Environmental Protection Agency 2014 (EPA) [14].

c. United States Department Agriculture Natural Resources Conservation Services (USDANRCS) 1997 [15].

d. Food and Agriculture Organization (FAO) 1994 [16].

3.1.2 Aguas residuales

Se define el agua residual como aquella que ha sido utilizada en cualquier uso benéfico. El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental para el diseño, operación y control de los sistemas de aguas residuales (recolección y tratamiento) [17].

También se define al agua residual, como el agua recogida de aguas residuales de las aglomeraciones urbanas causados por las actividades humanas o también la mezcla de estas con actividades agrarias, industriales y comerciales.

Las aguas blancas son aquellas procedentes de drenajes o escorrentía superficial y se caracterizan por tener escasa contaminación. Las aguas negras proceden de vertidos de la actividad humana (domestica), comercial, industrial, agrícola y se denotan por su alto grado de contaminación; en tanto que las aguas grises, provenientes de duchas, bañeras, lavatorios, suelen contener menos contaminantes que las aguas negras (especialmente en cuanto a agentes patógenos), y potencialmente pueden ser usadas para actividades de limpieza, riego y limpieza doméstica **[18]**.

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) ha definido a las aguas residuales como aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que, por su calidad, requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado **[19]**.

Los componentes de las aguas residuales pueden ser físicos, biológicos o químicos.

Los componentes y parámetros físicos de las aguas residuales son el color, el olor, los sólidos y la temperatura.

Los componentes biológicos más habituales en las aguas residuales son restos de animales y plantas.

Los componentes químicos más comunes en las aguas residuales son:

- Orgánicos: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles, etc.
- Inorgánicos: acidez y alcalinidad, cloruros, metales pesados, especies de nitrógeno, especies de fósforo, especies de azufre, etc.

Es muy importante tratar las aguas residuales, ya que pueden ser perjudiciales para la salud y para el medio ambiente. Gracias a los tratamientos podemos eliminar los elementos contaminantes del agua y reutilizarla para actividades como el riego en la agricultura o en las zonas urbanas para parques y jardines **[19]**.

Las aguas residuales se clasifican en:

- Aguas residuales domésticas (aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana).
- Aguas residuales industriales (aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras) y

- Aguas residuales municipales (aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas).

3.1.3 Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales [20][21].

Los diferentes tipos de tratamientos de las aguas residuales deben ser implementados con dos propósitos: la captación o separación de los sólidos y la estabilización biológica de los sólidos restantes. La selección de tecnologías para la recolección y tratamiento de las aguas residuales deberá considerar, cada vez en mayor medida, alternativas que incluyan el reúso del agua.

A continuación, se presentan criterios para la selección de un sistema de tratamiento:

- El método debe proveer una eficiencia de tratamiento en la remoción de varias categorías de contaminantes: materia orgánica biodegradable (DBO), amoníaco y compuestos orgánicos nitrogenados, fosfatos, patógenos.
- Debe ser alta la estabilidad del sistema respecto a interrupciones en la fuente de energía, picos de carga, interrupción en la alimentación o presencia de contaminantes tóxicos.
- La flexibilidad del proceso debe ser alta con respecto a la escala a la cual es aplicada, con posibilidades de ampliar el volumen de agua a procesar, y con posibilidad de mejorar la eficiencia del tratamiento.
- El sistema debe ser simple en su operación, mantenimiento y control, ya que una buena operación no debe depender de la presencia de operadores e ingenieros experimentados.
- El área requerida para la planta, debe ser la menor posible.
- El número de etapas de procesos (diferentes) requeridos debe ser el menor posible.
- El tiempo de vida del sistema debe ser largo.
- La aplicación del sistema no debe sufrir ningún problema en la disposición del lodo generado.
- La aplicación del sistema no debe ser acompañado con mal olor y problemas de malestar en su localidad.

En la Figura 1, se presenta un diagrama de elaboración propia, donde se muestran las etapas y procesos para el tratamiento de aguas residuales en la PTAR de SEDAPAL en Cieneguilla.

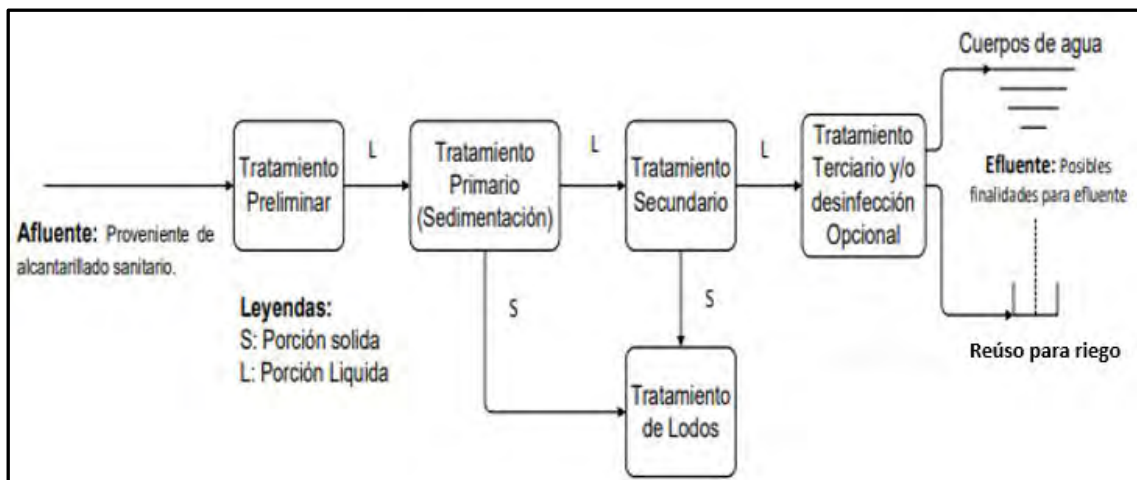


Figura 1. Etapas y procesos para el tratamiento de aguas residuales en la PTAR Cieneguilla - SEDAPAL.

Las etapas del tratamiento que se llevan a cabo en la PTAR de Cieneguilla son las siguientes:

- Tratamiento preliminar: Tamizado
- Tratamiento primario: Decantación o sedimentación
- Tratamiento secundario: Aireación
- Tratamiento terciario o desinfección: Tratamiento con cloro gaseoso

3.1.4 Bacterias en aguas residuales

Podemos clasificar las bacterias en dos grupos, según su relación a la estructura y composición química de sus paredes celulares: las bacterias Gram positivas y las bacterias Gram negativas [22].

La diferencia entre estos dos tipos de bacterias se basa en la tinción diferencial de Gram, la cual es empleada comúnmente en la microbiología para la visualización microscópica de bacterias. Esta técnica de tinción es utilizada para referirse a la morfología celular bacteriana y la diferenciación bacteriana, considerando las bacterias Gram positivas a

las que se visualizan de color morado, y las bacterias Gram negativas a las que se visualizan de color rosa rojo [30].

La pared de las bacterias Gram positivas es estructuralmente más gruesa y químicamente menos compleja que en las Gram negativas. En las bacterias Gram positivas hasta un 90% de la pared celular está constituida por un peptidoglicano. Estas bacterias pueden tener hasta 25 capas de peptidoglicano apiladas unas sobre otras. [22].

Muchas bacterias Gram positivas presentan, en su pared celular, polisacáridos ácidos embebidos denominados ácidos teicoicos, como se muestra en la Figura 2.

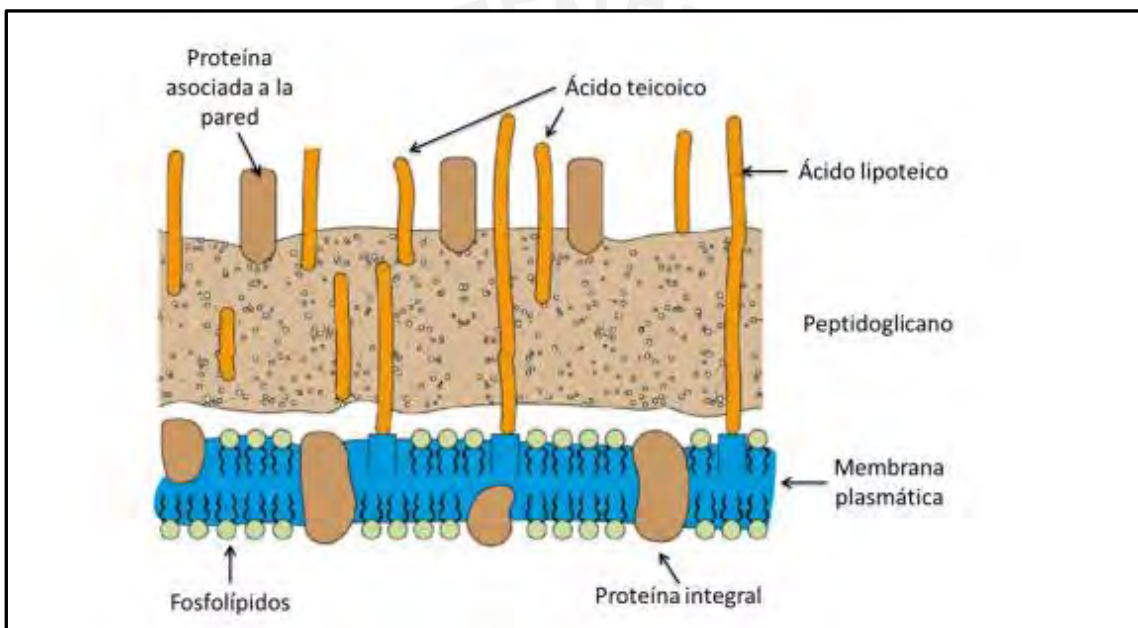


Figura 2. Diagrama de la pared celular Gram positiva. Tomado de Lucini et al, 2020 [22].

En las bacterias Gram negativas, sólo cerca del 10 % de la pared celular está constituida por peptidoglicano, y el resto consiste en lípidos, polisacáridos y proteínas que forman una capa exterior que se denomina membrana externa. La membrana externa es una segunda bicapa lipídica pero que, además de fosfolípidos y proteínas, presenta polisacáridos en su constitución química. Debido a que los lípidos y los polisacáridos se unen formando un complejo se conoce también como capa de lipopolisacárido (LPS), como se muestra en la Figura 3.

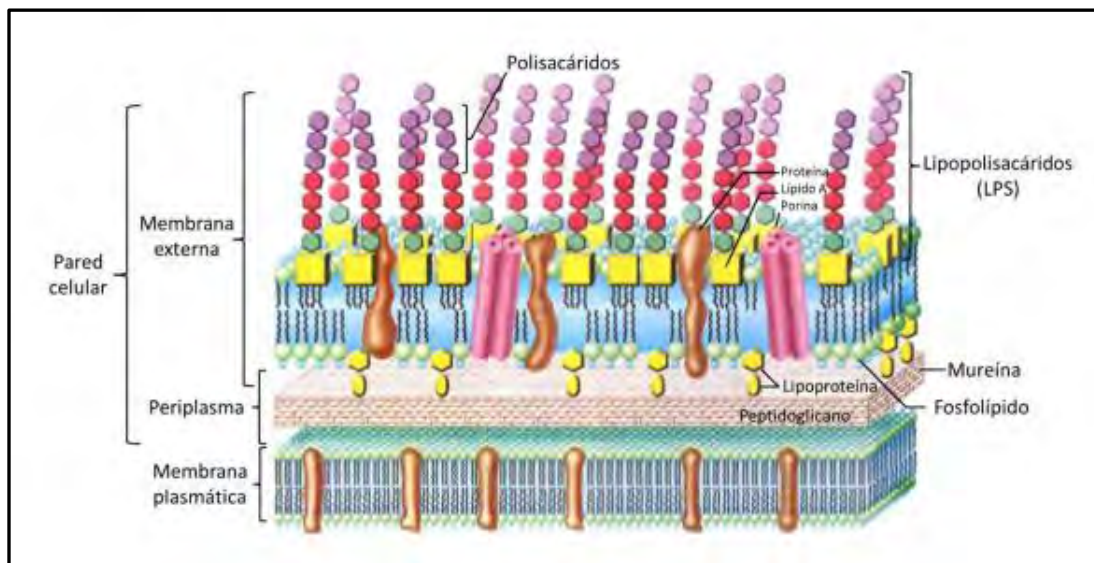


Figura 3. Diagrama de la pared celular Gram negativa. Tomado de Madigan et al, 2015 [33].

Aunque la función de la membrana externa es estructural, una importante propiedad biológica es que resulta tóxica para animales y el hombre, debido a que en ella se localizan endotoxinas. Algunos de los efectos tóxicos que provocan algunas de las bacterias patógenas Gram negativas más conocidas (especies de los géneros *Escherichia*, *Salmonella* y *Shigella*) se deben a las toxinas presentes en las membranas externas [22].

Los coliformes totales, se definen como bacterias Gram negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a 37 °C, producen ácido y gas de CO₂ en 24 horas. La presencia de coliformes totales indica que el cuerpo de agua ha sido o está contaminado con materia orgánica de origen fecal, ya sea por humanos o animales. Las bacterias que comúnmente se encuentran son *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella* [17].

Los coliformes termotolerantes, denominados así porque soportan temperaturas hasta de 45 °C, comprenden un número muy reducido de microorganismos, los cuales son indicadores de calidad por su origen. Integran el grupo de los coliformes totales, pero se diferencian de estos últimos en que son indol positivo, su intervalo de temperatura óptima de crecimiento es muy amplio (hasta 45 °C) y son mejores indicadores de higiene en alimentos y agua. La presencia de estos microorganismos indica la existencia de contaminación fecal de origen humano o animal, ya que las heces contienen coliformes

termotolerantes que están presentes en la microbiota intestinal, siendo la *E. coli* la más representativa, con un 90-100 % [12].

Es un indicador indirecto del riesgo potencial de contaminación con bacterias o virus de carácter patógeno, ya que las coliformes fecales siempre están presentes en las heces humanas y de los animales [17].

Las esporas son células que producen las bacterias con fines reproductivos. Ciertas bacterias producen esporas como una manera de defensa [23].

Las endosporas son células especializadas, no reproductivas, producidas en ambientes desfavorables. Su función primaria es asegurar la supervivencia en tiempos de tensión ambiental. Son extraordinariamente resistentes a la radiación (luz ultravioleta, rayos X y gamma), a la desecación, a la lisozima, al calor, a los desinfectantes químicos y a trituración mecánica [17].

Hasta el 15 % de la endospora contiene calcio en la base, que se piensa se utiliza para estabilizar el ADN. El ácido dipicolínico podría ser responsable de la resistencia acuática de la espora, mientras que el calcio puede ayudar a la resistencia a sales y agentes oxidantes. Sin embargo, los agentes mutágenos se encuentran aislados, sugiriendo que existen otros mecanismos que contribuyen a la resistencia térmica [23].

La estructura básica de una endospora se muestra en la Figura 4, y consta de las siguientes partes:

- Núcleo: parte central que contiene dipicolinato de Ca para resistencia.
- Membrana de la endospora.
- Corteza/Córtex: formada por peptidoglicano.
- Capa Cortical/Cutícula: la cual contiene proteínas con enlace disulfuro, que permite resistir a elevadas temperaturas.
- Exosporio/Exosporium: estructura más externa, formada por glicoproteínas.

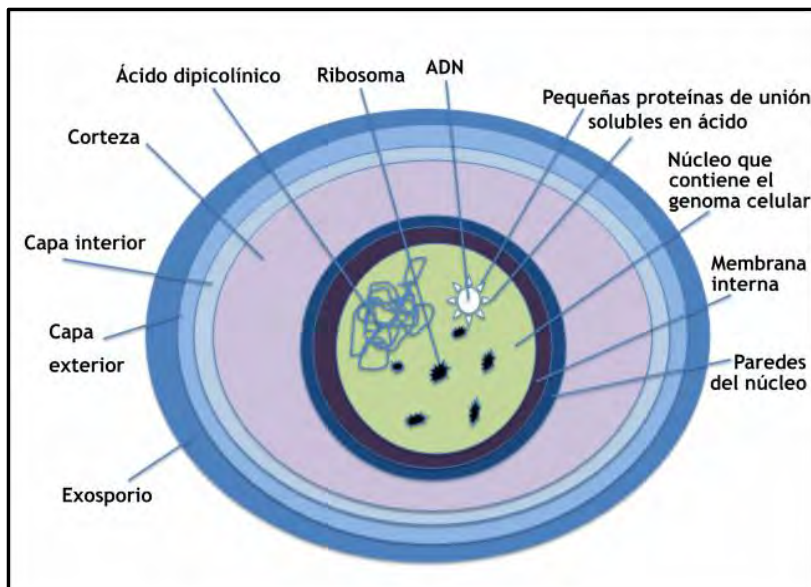


Figura 4. Diagrama de una endóspora. Tomado de Madigan et al, 2015 [33].

El ácido dipicolínico compone del 5 % al 15 % del peso seco de las esporas bacterianas. Ha sido implicado como responsable de la resistencia al calor de la endospora, aunque se han aislado mutantes resistentes al calor pero que carecen de ácido dipicolínico, lo que sugiere que están trabajando otros mecanismos que contribuyen a la resistencia al calor. Se sabe que dos géneros de patógenos bacterianos producen endosporas: el *Bacillus* aeróbico y el *Clostridium* anaeróbico [24].

El ácido dipicolínico forma un complejo con iones de calcio dentro del núcleo de la endospora. Este complejo se une a las moléculas de agua libres, provocando la deshidratación de la espora, como se muestra en la Figura 5. Como resultado, aumenta la resistencia al calor de las macromoléculas dentro del núcleo [33].

El complejo calcio-ácido dipicolínico también funciona para proteger el ADN de la desnaturalización por calor al insertarse entre las nucleobases, lo que aumenta la estabilidad del ADN [24].

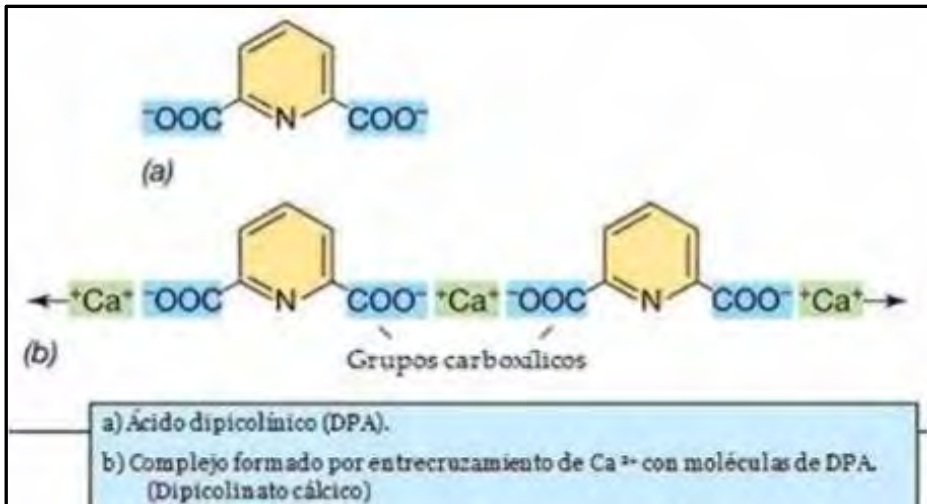


Figura 5. Ácido dipicolínico, Complejo formado con calcio (DPA). Tomado de Madigan et al, 2015 [33].

3.1.5 Potencial de oxidación-reducción

El potencial de oxidación-reducción (ORP) es el potencial (voltaje) al que se produce la oxidación en el ánodo (positivo) y la reducción en el cátodo (negativo) de una celda electroquímica. En términos simples, desde una perspectiva microbiana, una sustancia química oxidante extrae electrones de la membrana celular, lo que hace que se desestabilice y se destruya la integridad de la membrana celular que conduce a una muerte rápida de estos organismos.

El ORP se ha convertido cada vez más en un enfoque principal para estandarizar los parámetros de desinfección del agua. En lugar de monitorear exclusivamente la dosis de agente tratante (por ejemplo: en ppm), los usuarios ahora monitorean la actividad de este, ya que el ORP refleja el potencial antimicrobiano en el medio acuoso, independientemente de la calidad del agua [25]. La Figura 6 muestra las reacciones de oxidación y reducción del agua.

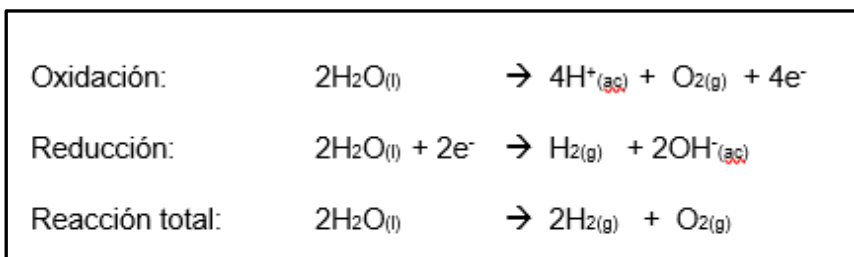


Figura 6. Reacciones oxidación y reducción del agua [34].

La medición de ORP ofrece muchas ventajas para el monitoreo y registro en tiempo real del potencial de desinfección del agua. Los sensores ORP son relativamente simples de manipular, casi como un termómetro digital o una sonda de pH, permitiendo un fácil monitoreo y seguimiento de los niveles críticos de desinfectante en los sistemas de agua. Por otro lado, el equipo requiere una rutina de mantenimiento, limpieza, calibración y verificación en sus mediciones [25].

3.1.6 Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR) para el sector Vivienda.

Con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes o emisiones, y con ello evitar daños a la salud y al ambiente, el Ministerio del Ambiente publicó el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, por el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR) para el sector Vivienda [26].

Tabla 2. Límites máximos permisibles para efluentes de PTAR. MINAM [26].

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR		
PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200
pH		6.5 - 8.5
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	< 35

3.1.7 Desinfección con ozono

La ozonización (desinfección con ozono) pertenece al grupo de Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), los cuales se definen como “procesos de oxidación que implican la generación de radical hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio”. Estos procesos eliminan compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, reduciendo así el carbono orgánico total (TOC), olor, color, sabor y turbidez de las aguas, y también compuestos refractarios (sustancias tóxicas y compuestos farmacéuticos) [27].

Si bien es necesario generar el ozono *in situ* mediante descargas eléctricas de alto voltaje, y la instalación del equipo implica un alto costo inicial, es un potente desinfectante tanto desde el punto de vista termodinámico como cinético [28].

La estructura molecular del ozono corresponde a la del oxígeno triatómico. Al ser termodinámicamente inestable, logra descomponerse con facilidad hacia una diversidad de especies radicalarias, incluyendo oxígeno atómico y diatómico. Es un oxidante fuerte (su potencial estándar de reducción a 25 °C es de 2.07 V), capaz de degradar a varias sustancias inorgánicas y orgánicas. La figura 7 muestra la resonancia en la molécula de ozono (estructura Lewis).

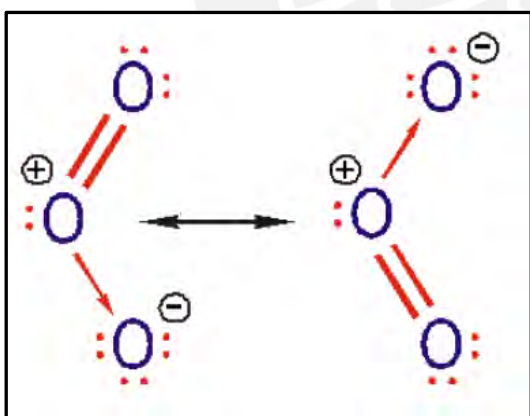


Figura 7. Resonancia en la molécula de ozono. Tomado de Losada et al, 1999 [35].

Esta facilidad del ozono de formar radicales libres se debe a su configuración electrónica. Tales radicales logran propagarse a través de mecanismos de reacciones elementales, pasando por la formación de radicales hidroxilos, los cuales son extremadamente reactivos con una diversidad de especies orgánica e inorgánicas presentes en el agua. Por tal motivo, estas reacciones acuosas del ozono pueden ser clasificadas como directas o indirectas [5].

Las reacciones directas son reacciones son muy selectivas, las cuales atacan a enlaces dobles y algunos grupos funcionales, donde la molécula de ozono reacciona con especies químicas presentes en la matriz (Ecuaciones 1 y 2). En tanto que las reacciones indirectas son consecuencia de la acción de los radicales hidroxilos resultantes de la descomposición del ozono en el agua (Ecuaciones 3 y 4) [5].



Las ventajas del ozono en la desinfección de agua se deben a que es más eficaz desactivando virus y bacterias que cualquier otro tratamiento de desinfección, mientras que al mismo tiempo requiere muy poco tiempo de contacto, reduciendo así el período del tratamiento para la degradación de los contaminantes.

Debido a su elevado potencial de oxidación, el ozono degradará eficazmente microbios y virus, causando la ruptura de la membrana celular y la descomposición de compuestos biomoleculares esenciales, reduciendo la carga de residuos nocivos en el medio acuoso tratado [32].

El tratamiento con ozono también previene el crecimiento de nuevos microorganismos, siempre y cuando los otros procesos implicados en el proceso de desinfección hayan sido eficaces en reducir las partículas presentes en la corriente del agua residual [29].

3.1.8 Generación de Ozono

La forma más común de generar ozono *in situ* para el tratamiento de aguas es mediante la descarga en corona, método también conocido como de “descarga eléctrica silenciosa”. El método consiste en conducir gas de oxígeno diatómico a través de un par de electrodos separados mediante un material dieléctrico y un espacio libre para las descargas eléctricas.

Al aplicar una diferencia de voltaje entre estos electrodos, un haz de electrones fluirá a través del este espacio libre. Este haz logra disociar las moléculas de oxígeno, formándose así el ozono [31].

En la Figura 8, se muestra, el esquema del “efecto corona”.

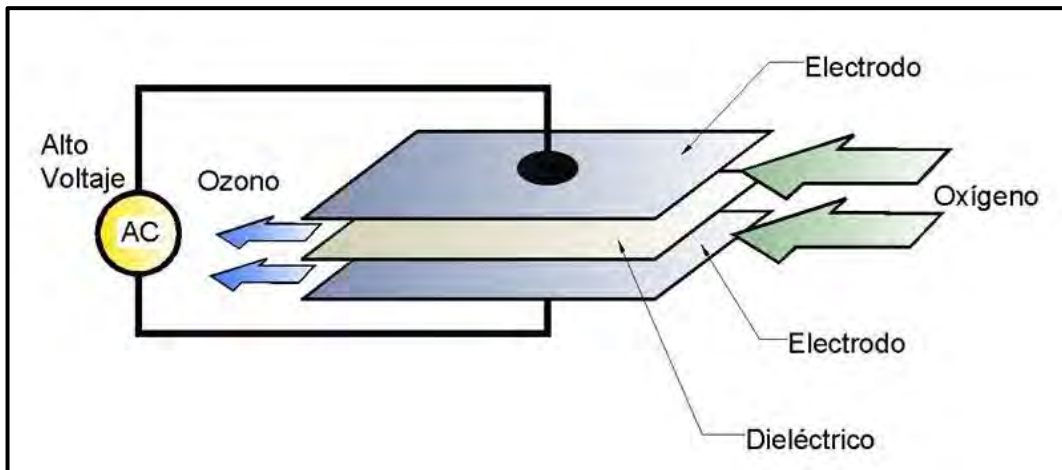


Figura 8. Esquema del efecto corona. Tomado de Top Ozono, Tecnología para crear ozono, blogs 2023 [31].

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción de la planta piloto para desinfección mediante ozono

La planta piloto que se utilizó para el estudio tiene las siguientes características:

- Velocidad máxima de 40 g/h en la generación de ozono
- Un tanque de contacto con capacidad de 2000 L
- Tablero de control fabricado en la PUCP (donde se registran parámetros ORP, tiempo, temperatura)
- Bomba neumática estándar de 2 hp de potencia

A continuación, en la Figura 9 se muestra el diagrama de la planta de ozono que incluye el detalle de sus componentes.

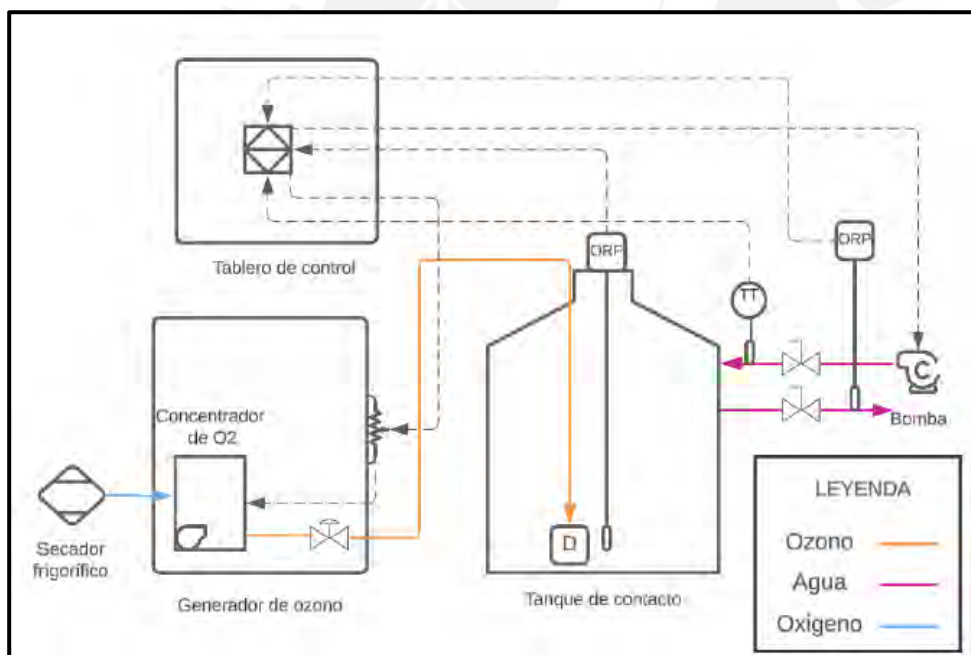


Figura 9. Diagrama de elaboración propia de la planta de ozono diseñada durante el proyecto de tesis.

El generador de ozono que utilizó la PTAR es el modelo GZO40-ES de la empresa OZONOTEC. Las especificaciones técnicas se presentan en la Figura 10.

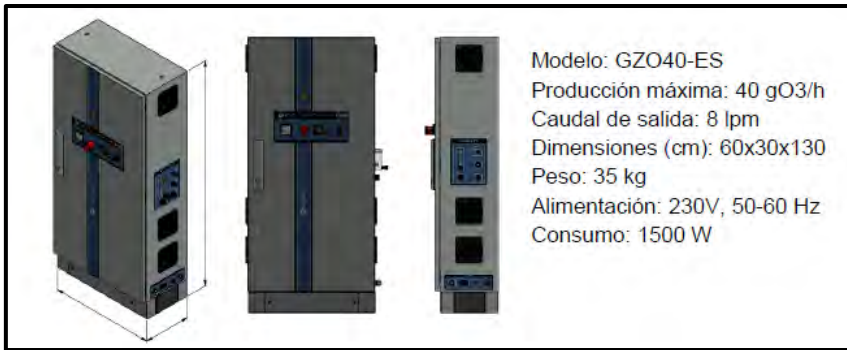


Figura 10. Generador de ozono de la marca OZONOTEC.

Una característica importante de la PTAR fue el uso de un difusor de ozono al interior del tanque de contacto, con las siguientes características, para obtener la mayor eficiencia y la difusión se realice desde la parte inferior del tanque de contacto.

- Material: titanio
- Diámetro: 100 mm
- Caudal de 1 a 2 m³/h.
- Micro diámetro de poro: 0.22µm~100µm
- Porosidad: 35%~50%. • Disco de diámetro Φ150 mm
- Grosor: 3 mm • Tamaño burbuja: 0.1~2 mm
- Conexión de 1/2"
- Ubicación: centrado a una altura de 15 cm del fondo del tanque

En la Figura 11 se muestra el tanque de contacto donde se da la reacción entre el agua residual y el ozono generado. Este tanque tiene una capacidad máxima de 2000 L, y está hecho de polietileno para evitar su reacción con el ozono.

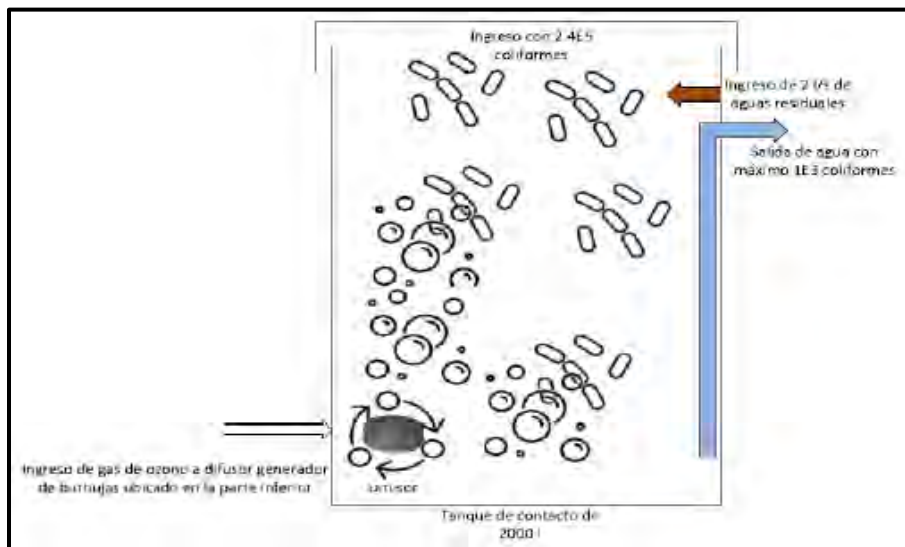


Figura 11. Representación esquemática de elaboración propia, de la reacción del ozono con el agua residual en el tanque.

El tablero de control permite la operación de la planta piloto a través del accionamiento, parada nominal y acción de emergencia de toda la alimentación eléctrica del sistema. Además, mediante un variador de velocidad durante la operación nominal, una bomba de 2 hp permite el control de flujo del agua residual a ingresar al tanque de contacto. Este variador se regula desde un controlador PLC (Programmer Logic Controller) mediante señales de corriente.

Así también, el tablero posibilita el registro y visualización de medición de señales de ORP y temperatura, los cuales se conectan con módulos de entradas analógicas al PLC, el cual a su vez envía las señales a una interfaz HMI (human-machine interface) de tipo Panel View para interacción con los usuarios.

En la Figura 12 se muestra el tablero de control de la planta piloto que se utilizó en los ensayos de desinfección con ozono.



Figura 12. Fotografía tomada del Tablero de control de la planta de desinfección con ozono.

En la Figura 13 se muestra la planta de desinfección con ozono, donde se llevaron a cabo los ensayos de tratamiento terciario del agua residual.



Figura 13. Fotografía tomada de las instalaciones de la planta de desinfección con ozono utilizada durante el proyecto de investigación.

4.2. Parámetros y equipos utilizados en el monitoreo in situ.

La Tabla 3 resume los parámetros fisicoquímicos, los equipos utilizados, y sus rangos de detección durante el proceso de monitoreo en la planta de tratamiento.

Tabla 3. Tabla elaborada, con los parámetros controlados, equipos utilizados y rangos de detección.

Parámetro fisicoquímico	Equipo utilizado	Rango de detección
Potencial de oxidación-reducción, ORP (mV)	Sensor ORP, modelo GZO40-ES de la marca OZONOTEC	-1000 mV a +1000 mV
Oxígeno diatómico disuelto (mg/mL)	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	0.01 mg/L - 30 mg/L
Rango pH de acidez	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	pH: 2.00-12.00 ± 0.01
Conductividad electrolítica (ms/cm)	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	1 µS/cm - 199.9 S/cm
Temperatura (Celsius)	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	0.0 °C a 60.0 °C
Ozono disuelto O ₃ (mg/L)	DR300 Pocket Colorimeter Marca: HACH	0.01 mg/L O ₃ - 0.75 mg/L O ₃
Sólidos totales disueltos STD (ppm)	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	0~199,9 ppm 0~150,0 ppt
Salinidad (ppt)	Multiparámetro AZ Instrument Corp 86031	0.01 ppt-0.1 ppt
Turbidez (NTU)	Lovibond® TB 211	0.01 – 1100 NTU

4.3. Parámetros fisicoquímicos

4.3.1 Oxígeno disuelto (OD)

El contenido de oxígeno libre disuelto en agua es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos presentes en el volumen acuático. Es por ello que la cantidad de oxígeno disuelto constituye un indicador de la capacidad del medio acuoso de mantener la vida acuática.

Las principales causas de desoxigenación del agua se deben a actividades biológicas.

Por otro lado, en cuanto a los procesos de tratamiento de agua residual, se busca finalmente la degradación oxidativa de contaminantes químicos y biológicos, incluyendo los microorganismos presentes.

4.3.2 Rango pH de acidez

El pH es el potencial de hidrógeno. Es una medida para determinar el grado de acidez de una disolución. Cada cambio de una unidad de pH multiplica por 10 la fuerza de acidez o alcalinidad de dicha agua: así, un agua con pH 6 es 10 veces más ácida que una con pH 7.

El pH del agua indica el comportamiento ácido o básico de la misma, tiene influencia sobre determinados procesos químicos y biológicos, es de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática, ya sea generando daño en los peces o proliferando el crecimiento de algas. El pH del medio también influye sobre la actividad microbiológica en el agua residual.

4.3.3 Conductividad electrolítica (CE)

Se define como la capacidad de un medio electrolítico de conducir la corriente eléctrica y, por tanto, se relaciona con el valor inverso de la resistencia óhmica que ofrece el medio. Es una variable que depende de la cantidad de sales disueltas en el medio líquido. La unidad de medición utilizada comúnmente es el siemens/cm (S/cm), microsiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$), o milisiemens/cm (mS/cm).

La CE en un cuerpo de agua se ve afectada por la presencia de sólidos inorgánicos disueltos, tales como aniones cloruro, nitrato, sulfato y fosfato, o cationes de sodio, magnesio, calcio, hierro, y aluminio, mientras que los compuestos orgánicos suelen ofrecer valores menores de CE.

4.3.4 Temperatura

La temperatura es una variable física que influye notablemente en la calidad de agua, pues por lo general influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, así como en la termodinámica de una serie de procesos como la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración.

4.3.5 Sólidos totales disueltos (TDS)

El valor de sólidos totales disueltos (Total Dissolved Solids, TDS) es uno de los principales indicadores de la calidad del agua. Este valor TDS cuantifica el contenido de sales y compuestos orgánicos disueltos en forma de partículas microscópicas (menos de 2 micras de diámetro) y se puede expresar en mg/L, g/m³ o ppm. Estas partículas microscópicas disueltas se diferencian de partículas coloidales o macroscópicas de dimensiones mayores.

4.3.6 Salinidad

La salinidad del agua es el contenido total de sales. Así la cantidad de cloruro sódico es una parte de esta salinidad y la dureza del agua (sales de magnesio y calcio) es otra parte de la salinidad del agua. Es un parámetro muy importante para el uso de aguas en riego. El hecho de que el agua tenga sales en disolución, hace que esta sea conductora de electricidad.

El contenido de electrólitos disueltos determina la fuerza iónica del medio, constituyéndose en un factor importante en ciertos procesos en medio acuoso, como la termodinámica y cinética de reacciones químicas (particularmente de oxidación), precipitación de sólidos y lodos, coagulación y floculación de partículas coloidales, flotación, actividad celular y microbiológica, etc.

4.3.7 Turbidez

Es originada por las partículas en suspensión o coloides, es decir, causada por las partículas que, por su tamaño se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en menor o mayor grado. La unidad utilizada para expresarla es la unidad nefelométrica de turbidez (NTU).

4.4 Equipos utilizados en las mediciones

4.4.1 Multiparámetro para medir pH, conductividad y oxígeno disuelto 86031

Mediante un potenciómetro incorporado en este equipo, el medidor Multiparámetro (86031 de AZ Instrument Corp) permite realizar una serie de pruebas en medio acuoso tales como mediciones de pH, conductividad electrolítica, salinidad, oxígeno disuelto y la temperatura. En la Figura 14 se muestra el kit y equipo Multiparámetro usado en los ensayos realizados en la PTAR de Cieneguilla.



Figura 14. Multiparámetro para medir pH, conductividad y oxígeno disuelto 86031.

4.4.2 Pocket Colorimeter DR300 para medir ozono

El DR300 es un fotómetro de filtro portátil que sirve para analizar el contenido de ozono disuelto en el agua.



Figura 15. Fotómetro Pocket Colorimeter DR300 para medir ozono disuelto en agua.

4.4.3 Turbidímetro Lovibond® Water Testing Tintometer® Group

Instrumento compacto Lovibond® TB 211 IR, para un análisis *in situ*, rápido y preciso de la turbidez mediante luz infrarroja.



Figura 16. Lovibond® Water Testing Tintometer® Group

4.5 Ensayos realizados en Laboratorio SGS

Para el monitoreo en la planta de tratamiento, se presentan en la Tabla 4 los métodos de análisis utilizados para la medición de los parámetros: sólidos totales en suspensión (TSS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_{5,20}), coliformes totales y coliformes termotolerantes. Todos estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio SGS.

Tabla 4. Lista de ensayos realizados en Laboratorio SGS.

ANÁLISIS	MÉTODO	LÍMITE DE DETECCIÓN	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	ACREDITACIÓN/ALCANCE
CX Numeración de Coliformes Totales (NMP/100 mL)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221B; 23rd Ed; 2017. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique	N.A	1.8 NMP/100 mL	NTP-ISO/IEC 17025:2017 / AAC, AB, AC, ACE, AIRP, AIRS, AL, ALA, AM, AP, APR, ARD, ARI, ARM, AS, ASL, ASUB, SAL
Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B ;23rd Ed: 2017. Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5-Day BOD test	1 mg/L	2.6 mg/L	NTP-ISO/IEC 17025:2017 / AAC, AB, AC, ACE, AIRP, AIRS, AL, ALA, AM, AP, APR, ARD, ARI, ARM, AS, ASL, ASUB, SAL
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D: 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017	1.8 mg O ₂ /L	4.5 mg O ₂ /L	NTP-ISO/IEC 17025:2017 / AAC, AB, AC, ACE, AIRP, AL, ALA, AP, APR, ARD, ARI, ARM, AS, ASUB
Sólidos Totales en Suspensión (mg/L)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D: 23rd: 2017. Solids: Total Suspended Solids dried at 103-105 °C. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017	1 mg Sólidos Totales en suspensión/L	3 mg Sólidos Totales en suspensión/L	NTP-ISO/IEC 17025:2017 / AAC, AB, AC, ACE, AIRP, AIRS, AL, ALA, AM, AP, APR, ARD, ARI, ARM, AS, ASL, ASUB, SAL

4.5.1 Sólidos totales en suspensión (TSS)

Son nocivos en exceso y pueden ser un indicador de la calidad de cualquier muestra de agua, ya sea del océano o de aguas residuales.

Cuando se vierte agua a través de un filtro previamente pesado, las partículas que quedan una vez que el filtro se seca se clasifican como sólidos totales en suspensión (Total Suspended Solids, TSS).

Las cantidades elevadas de sólidos en suspensión en lagos, embalses, ríos y arroyos pueden tener efectos nocivos para el sistema ecológico. De ahí la conveniencia de reducir su carga en las PTARs.

4.5.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es una prueba ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica de una muestra de agua. A diferencia de la DBO, en esta prueba la materia orgánica es oxidada utilizando una sustancia química y no microorganismos. El dicromato de potasio constituye actualmente el mejor agente oxidante para la determinación de la DQO.

Este compuesto tiene la capacidad de oxidar la gran mayoría de sustancias orgánicas, además, es fácil de determinar su concentración antes y después de la prueba, lo cual hace que se pueda calcular el oxígeno consumido.

4.5.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20})

La DBO se mide determinando la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos (bacterias principalmente) para oxidar a la materia orgánica. La prueba de DBO más conocida es la DBO₅. Esta prueba se realiza incubando la muestra de agua en el laboratorio y, al cabo de cinco días, se mide el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos para oxidar carbono.

Los resultados se reportan en mg/L de oxígeno consumido. En forma similar, la prueba DBO₂₀ se realiza en un lapso de veinte días para determinar el consumo de oxígeno para la oxidación de carbono y nitrógeno.

4.5.4 Coliformes totales

Los coliformes totales son bacterias que se pueden encontrar en el ambiente. Aunque su presencia no indica necesariamente contaminación fecal, revelan que el alimento estuvo expuesto a una contaminación general.

Su presencia indica que el cuerpo de agua ha sido o está contaminado con materia orgánica de origen fecal, ya sea por humanos o animales.

4.5.5 Coliformes termotolerantes

Los coliformes termotolerantes (CTT), denominados así porque soportan temperaturas hasta de 45 °C, comprenden un número muy reducido de microorganismos, los cuales son indicadores de calidad por su origen. En su mayoría están representados por *Escherichia coli*, pero se pueden encontrar de forma menos frecuente las especies *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae*. Estas últimas forman parte de los coliformes termotolerantes, pero su origen normalmente es ambiental (fuentes de agua, vegetación y suelos) y solo ocasionalmente forman parte del microbiota normal.

5. RESULTADOS

5.1. Proceso de ozonización de agua potable en condiciones “batch” (sin flujo).

5.1.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*

Estos ensayos preliminares fueron realizados con ayuda del equipo Multiparámetro, con la planta piloto instalada dentro de la PUCP (Jardines del Pabellón “V”), con la finalidad de estudiar la evolución de los parámetros fisicoquímicos (medidas *in situ*) del agua potable (disponible), a ozonizaciones de: **20 g/h, 30 g/h y 40 g/h** en condiciones “batch” (sin flujo).

A continuación, en la Tabla 5, se muestran los resultados obtenidos para la evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 20 g/h durante 60 minutos de agua potable (local) a condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 5. Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 20 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	ORP externo (mV)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)
0	558	20	0	450	5.5	334	7.20	346	22.30
3	970	20	0	445	6.3	337	7.30	334	22.40
6	1,008	20	0	530	7.1	336	7.40	343	22.10
9	1,030	20	0	560	7.5	336	7.84	351	22.40
12	1,040	20	0	590	8.0	336	8.03	351	22.30
15	1,046	20	0	780	8.4	335	8.09	350	22.20
20	1,051	20	0	790	9.0	337	8.00	350	22.30
25	1,063	20	0	810	10.0	336	7.99	347	22.40
30	1,061	20	0	800	10.8	337	8.03	350	21.90
35	1,067	20	0	810	11.0	335	8.07	365	21.80
40	1,068	20	0	845	12.3	337	8.33	444	21.40
45	1,067	20	0	859	12.5	337	8.32	439	21.40
50	1,072	20	0	860	13.0	339	8.20	440	21.40
55	1,071	20	0	868	13.1	339	8.17	441	21.30
60	1,071	20	0	868	13.5	338	8.16	434	21.30

Todos estos parámetros fueron medidos *in situ* en el reactor generador de ozono.

De los resultados, observamos las siguientes tendencias en la evolución de los parámetros en el tiempo: los sólidos totales disueltos (TDS) se mantienen casi sin

variación, el pH aumenta ligeramente de 7.20 hasta 8.16, la conductividad electrolítica (CE) aumenta en 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura se mantuvo en el rango de 21.3°C a 22.4°C. Se obtuvo una variación considerable en los parámetros ORP (mV), O_2 disuelto (mg/L), a los cuales se les analiza su comportamiento individualmente.

A continuación, se muestran las gráficas de la evolución en el tiempo de los parámetros ORP interno y externo, obtenidos en la Tabla 5.

En la gráfica de la Figura 17, se muestra la evolución en el tiempo del ORP interno y externo, durante la ozonización a 20 g/h de agua potable, bajo condiciones “batch” (sin flujo).

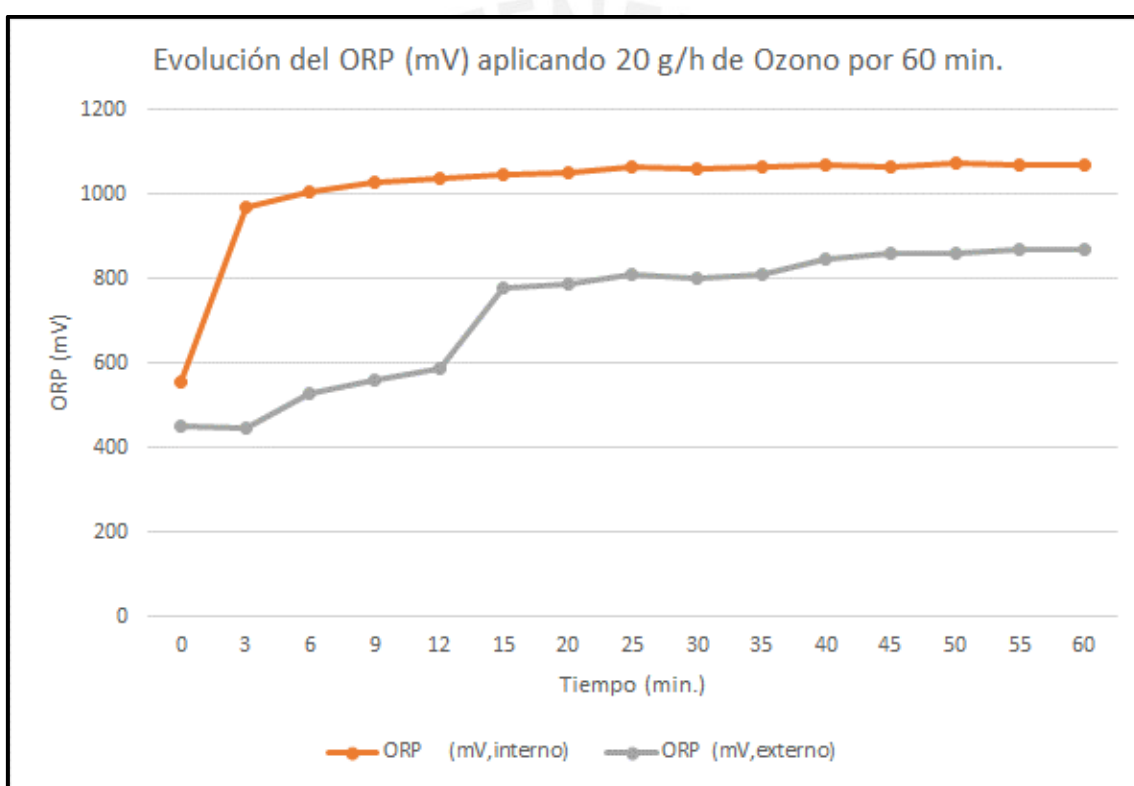


Figura 17. Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 20 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos .

Para el ORP interno se obtiene un comportamiento estable luego de 3 minutos de ozonización, y valores de ORP entre 1,000 y 1,100 mV.

Para el ORP externo, la estabilidad de los valores se obtiene luego de 15 minutos. Estas muestras fueron tomadas en el “rebose” del reactor.

En la gráfica de la Figura 18, se muestra la evolución en el tiempo del oxígeno disuelto, para una ozonización a 20 g/h de ozono del agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

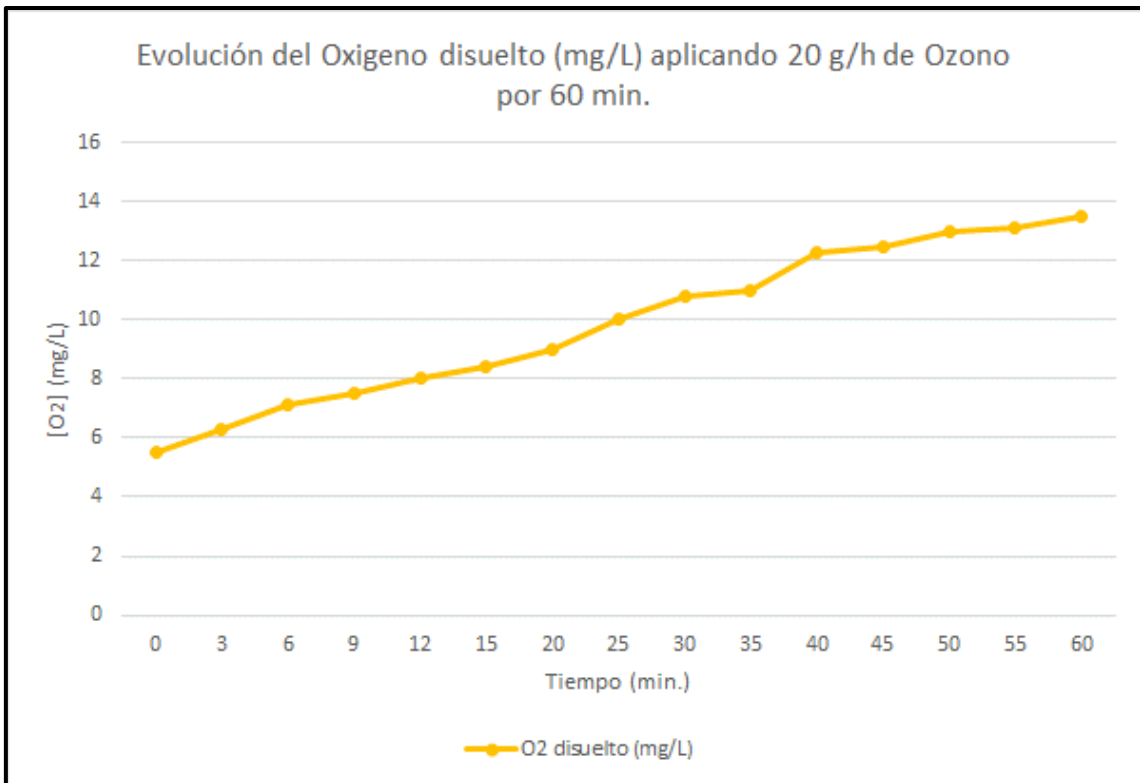


Figura 18. Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 20 g/h de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Se observa una evolución creciente que, luego de 60 minutos, llega hasta un valor aproximado de 13.50 mg/L de oxígeno disuelto.

A continuación, en la Tabla 6, se muestran los resultados obtenidos para la evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 30 g/h durante 60 minutos de agua potable (local) a condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 6. Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 30 g/h de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	ORP externo (mV)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (µS/cm)	T° C (Celsius)
0	590	30	0	452	5.7	337	7.68	618	21.30
3	972	30	0	481	6.4	335	8.27	621	21.40
6	1,019	30	0	573	7.0	339	8.26	652	21.30
9	1,040	30	0	616	7.5	336	8.27	650	21.20
12	1,045	30	0	719	8.4	335	8.31	644	21.30
15	1,045	30	0	784	9.2	335	8.30	650	21.30
20	1,059	30	0	814	10.3	337	8.31	650	21.20
25	1,059	30	0	826	11.5	336	8.31	652	21.10
30	1,062	30	0	840	12.1	338	8.35	653	21.10
35	1,063	30	0	855	13.2	335	8.36	656	21.00
40	1,063	30	0	865	13.6	337	8.39	654	20.90
45	1,064	30	0	872	14.3	336	8.40	654	20.80
50	1,065	30	0	871	14.5	339	8.44	649	20.80
55	1,066	30	0	875	14.7	337	8.44	650	20.70
60	1,070	30	0	880	15.0	338	8.45	652	20.60

Todos estos parámetros fueron medidos *in situ* en el reactor de generación de ozono.

De los resultados, observamos ciertas tendencias en la evolución temporal de los siguientes parámetros fisicoquímicos: los sólidos totales disueltos (TDS) se mantienen casi sin variación, el pH aumenta ligeramente de 7.68 hasta 8.45, la conductividad electrolítica (CE) aumenta en 34 µS/cm y la temperatura se mantuvo en el rango de 20.6°C a 21.3°C.

Se obtuvo una variación considerable en los parámetros ORP (mV), O₂ disuelto (mg/L), a los cuales se les analiza su comportamiento individualmente.

A continuación, se muestran las gráficas de la evolución de los parámetros ORP interno y externo, obtenidos en la Tabla 6.

En la gráfica de la Figura 19, se muestra la evolución en el tiempo del ORP interno y externo, en la ozonización a 30 g/h de agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

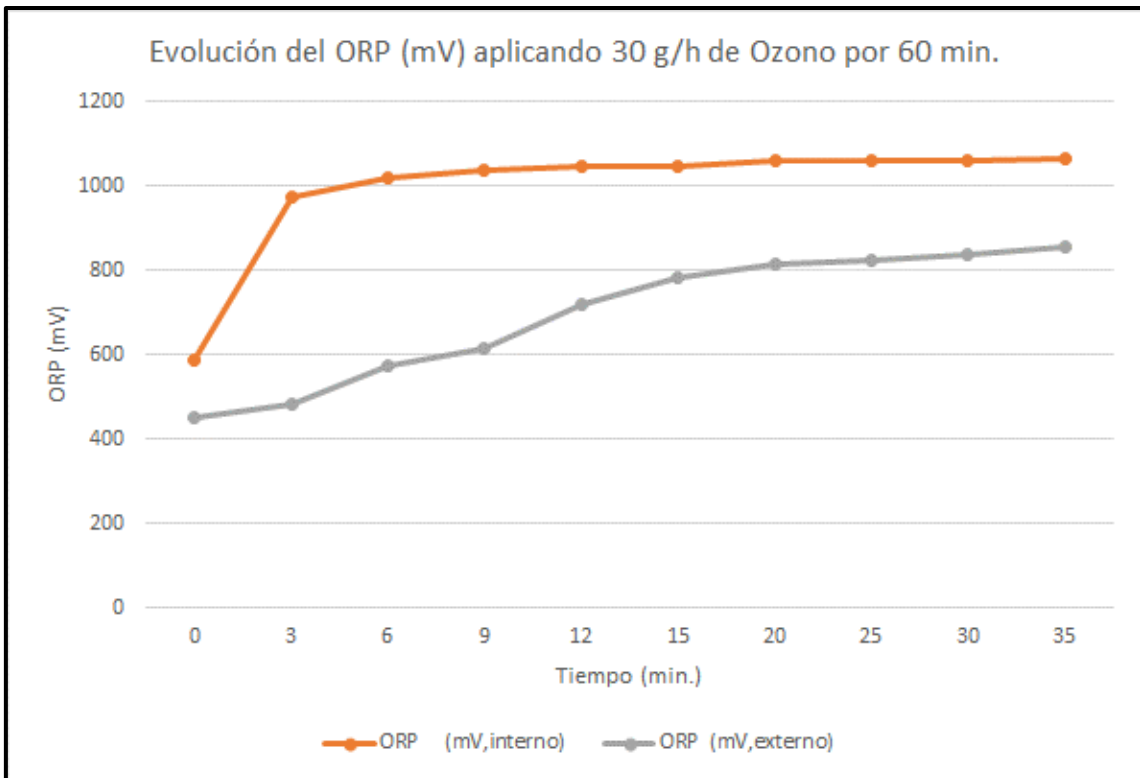


Figura 19. Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 30 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Para el ORP interno se obtiene un comportamiento estable luego de 3 minutos de ozonización, y valores de ORP entre 1,000 y 1,100 mV.

Para el ORP externo, la estabilidad de los valores se obtiene luego de 15 minutos.

Estas muestras fueron tomadas en el “rebose” del reactor.

En la gráfica de la Figura 20, se muestra la evolución en el tiempo del oxígeno disuelto, para una ozonización a 30 g/h de ozono, del agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

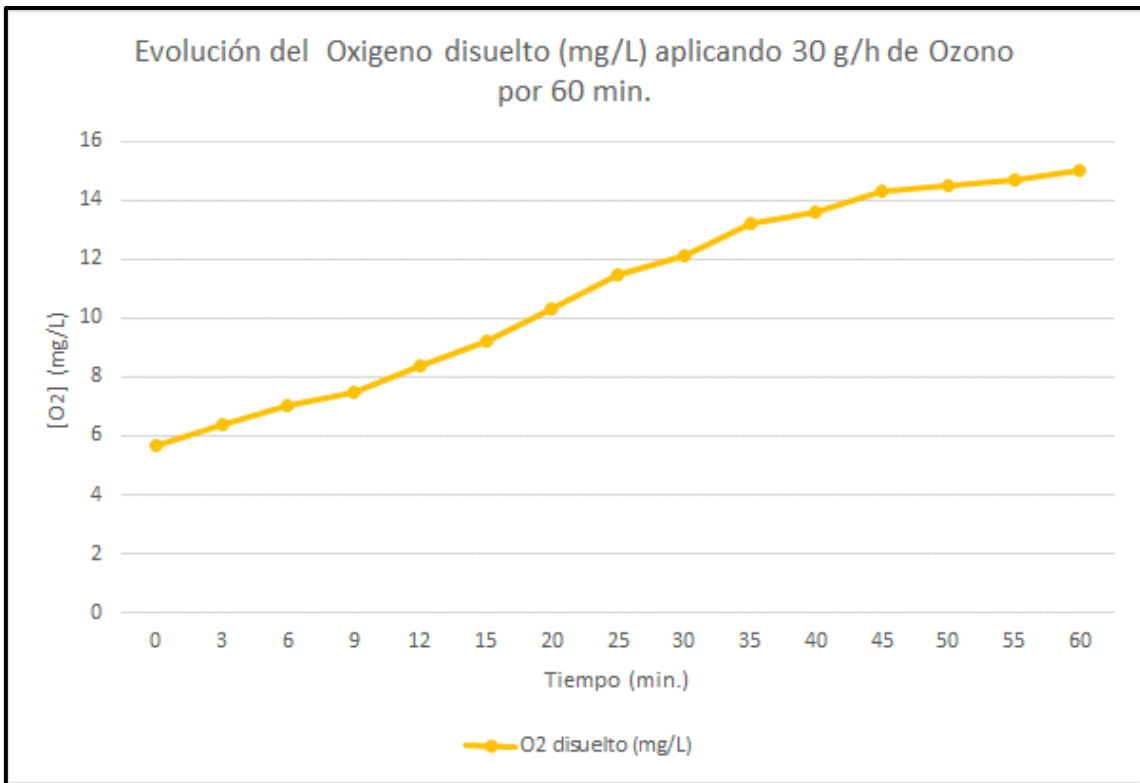


Figura 20. Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 30 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Se observa una evolución creciente que, luego de 60 minutos, llega hasta un valor aproximado de 13.50 mg/L de oxígeno disuelto.

A continuación, en la Tabla 7, se muestran los resultados obtenidos para la evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 40 g/h durante 60 minutos de agua potable (local) a condiciones “batch” (sin flujo)

Tabla 7. Evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	ORP externo (mV)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)
0	571	40	0	350	5.3	337	7.62	673	21.10
3	936	40	0	430	5.7	337	7.14	678	21.10
6	999	40	0	472	6.4	339	7.25	673	21.40
9	1,019	40	0	532	6.6	336	7.31	674	21.70
12	1,030	40	0	612	7.3	336	7.34	675	21.60
15	1,037	40	0	639	7.6	335	7.40	676	21.40
20	1,046	40	0	698	8.4	337	7.40	672	21.60
25	1,051	40	0	722	9.3	336	7.38	677	21.30
30	1,053	40	0	750	10.3	338	7.42	674	21.30
35	1,056	40	0	766	10.7	335	7.43	678	21.40
40	1,057	40	0	790	11.0	337	7.44	671	21.30
45	1,059	40	0	800	11.1	337	7.48	674	21.20
50	1,062	40	0	810	11.6	339	7.48	677	21.20
55	1,059	40	0	825	13.3	338	7.50	677	21.20
60	1,061	40	0	828	13.5	338	7.53	679	21.10

Todos estos parámetros fueron medidos *in situ* en el reactor de generación de ozono. De los resultados, observamos ciertas tendencias en la evolución temporal de los siguientes parámetros fisicoquímicos: los sólidos totales disueltos (TDS) se mantienen casi sin variación, el pH fluctúa ligeramente entre 7.14-7.62, la conductividad electrolítica (CE) aumenta en 6 $\mu\text{S/cm}$ y la temperatura se mantuvo en el rango de 21.1°C a 21.6°C. Se obtuvo una variación considerable en los parámetros ORP (mV) y O_2 disuelto (mg/L), a los cuales se les analiza su individualmente.

5.1.2 Estudio de la evolución del ozono libre medidos *in situ*.

A continuación, se muestran las gráficas de la evolución de los parámetros ORP interno y externo, obtenidos en la Tabla 8.

En la gráfica de la Figura 21, se muestra la evolución en el tiempo del ORP interno y externo, en la ozonización a 40 g/h de agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

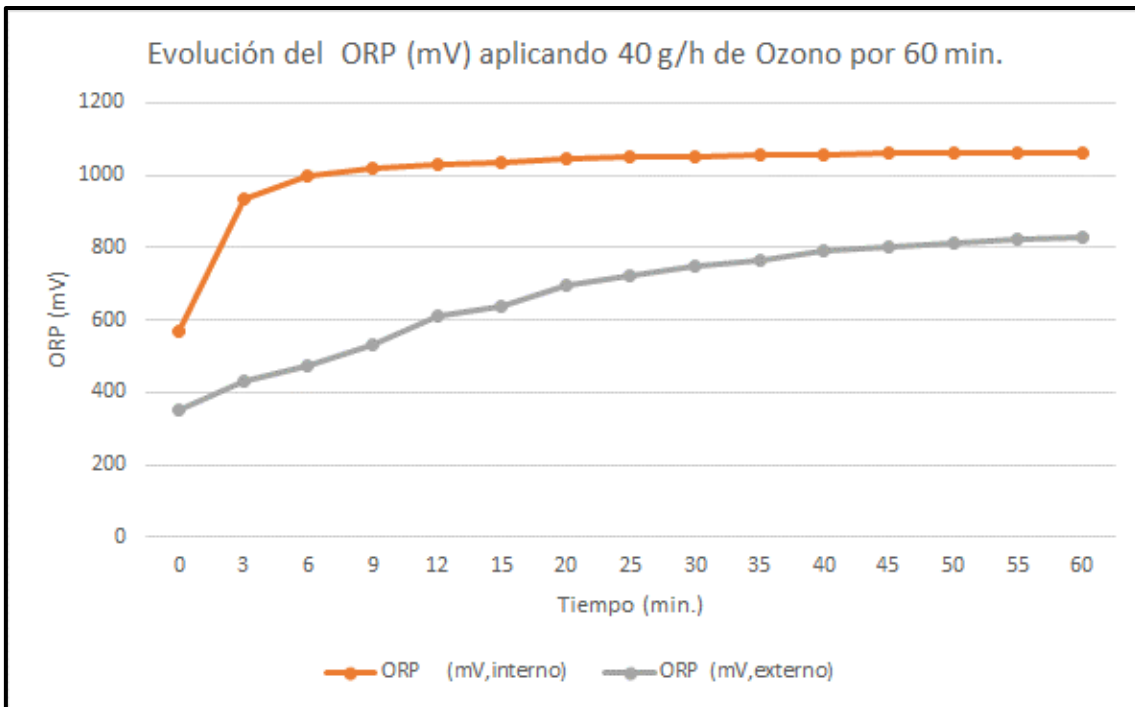


Figura 21. Evolución del ORP (externo e interno), durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Para el ORP interno se obtiene un comportamiento estable luego de 3 minutos de ozonización, y valores de ORP entre 1,000 y 1,100 mV.

Para el ORP externo, la estabilidad de los valores se obtiene luego de 15 minutos. Estas muestras fueron tomadas en el “rebose” del reactor.

En la gráfica de la Figura 22, se muestra la evolución en el tiempo del oxígeno disuelto, para una ozonización a 40 g/h de ozono del agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

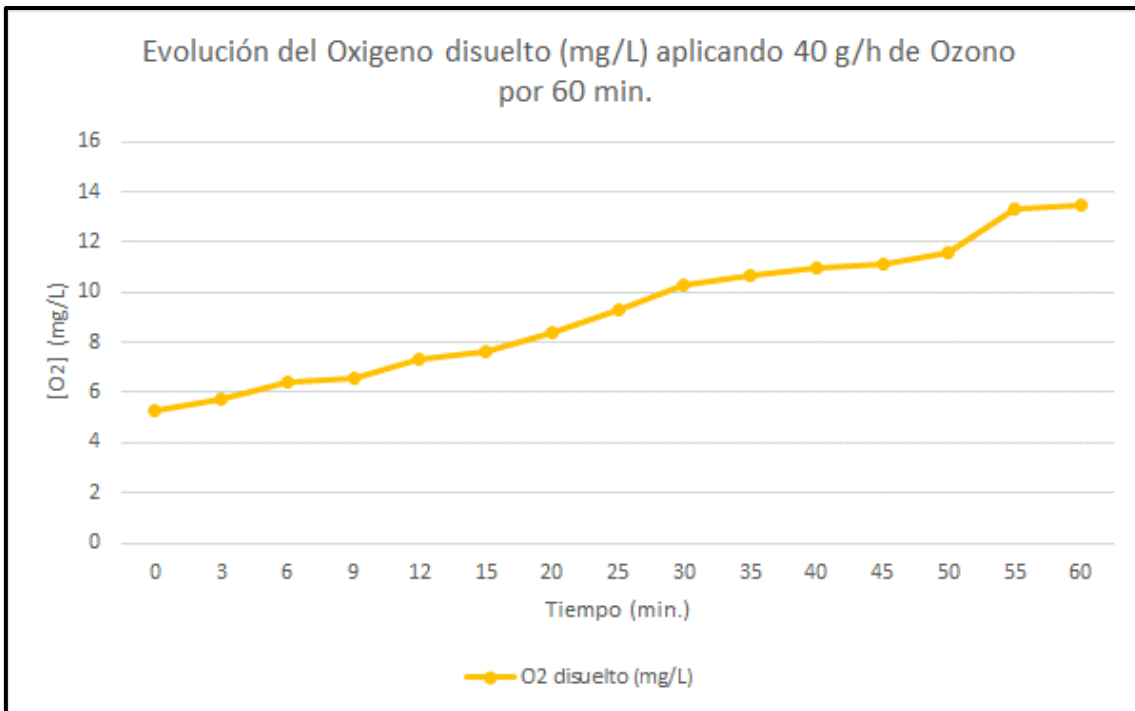


Figura 22. Evolución del oxígeno disuelto, durante la ozonización a 40 g/h, de agua potable en condiciones “batch” durante 60 minutos.

Se observa una evolución creciente que, luego de 60 minutos, llega hasta un valor aproximado de 13.50 mg/L de oxígeno disuelto.

A continuación, se presentan los ensayos realizados para estudiar la presencia de ozono libre que se encuentre presente en el agua potable del reactor luego de una ozonización de 30 g/h y de 40 g/h durante 60 minutos. Estos ensayos fueron realizados en la PTAR SEDAPAL-Cieneguilla.

Estos ensayos tienen por objetivo monitorear la presencia de ozono libre (mg/L) disponible al interior del reactor.

En la Tabla 8 y Tabla 9, se muestra la evolución de los parámetros fisicoquímicos y el ozono libre (mg/L) en el tanque de reacción, durante una ozonización a **30 g/h y a 40 g/h** respectivamente, del agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 8. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 30 g/h, de agua potable bajo condiciones “batch”(sin flujo) por un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Ozono Libre (mg/L)
0	687	30	0	5.6	103	6.96	900	24.20	0.11	0.00
5	799	30	0	7.1	579	6.76	1,165	24.20	0.62	0.32
10	959	30	0	7.9	574	6.77	1,154	24.40	0.63	0.62
15	1,010	30	0	8.9	578	6.86	1,156	24.40	0.63	FUERA RANGO
20	1,044	30	0	9.7	579	6.86	1,158	24.30	0.61	FUERA RANGO
25	1,057	30	0	10.2	577	6.86	1,161	24.30	0.63	
30	1,062	30	0	11.7	582	6.86	1,163	24.30	0.63	
35	1,059	30	0	12.1	583	6.86	1,169	24.70	0.62	
40	1,068	30	0	12.5	580	6.86	1,160	23.90	0.63	
45	1,065	30	0	12.6	587	6.86	1,175	23.40	0.64	
50	1,067	30	0	12.7	580	6.90	1,172	23.40	0.62	
55	1,068	30	0	13.0	585	6.93	1,175	23.40	0.63	
60	1,070	30	0	13.6	584	7.00	1,166	24.10	0.63	

De la Tabla 8, podemos observar lo siguiente:

A los 5 minutos de ozonización, se obtuvo un valor de ozono libre de 0.32 mg/L con un valor de ORP de 799 mV.

A los 10 minutos de ozonización, se obtuvo un valor de ozono libre de 0.62 mg/L con un valor de ORP de 959 mV.

A los 15 minutos de ozonización, el valor de ozono libre se encontraba fuera de rango de detección, mayor a 0.75 mg/L, con un valor de ORP de 1,010 mV.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de ozono libre continuaba fuera de rango de detección, mayor a 0.75 mg/L, con un valor de ORP de 1,044 mV.

Tabla 9. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 40 g/h, de agua potable bajo condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Ozono Libre (mg/L)
0	639	40	0	5.8	492	6.95	996	22.40	0.53	0.00
5	786	40	0	6.4	497	6.97	993	22.70	0.53	0.28
10	948	40	0	7.4	499	6.97	998	22.40	0.53	0.72
15	997	40	0	8.1	500	6.96	1,001	22.40	0.53	FUERA RANGO
20	1,011	40	0	8.6	493	6.95	997	22.40	0.53	FUERA RANGO
25	1,024	40	0	10.6	492	6.97	995	22.30	0.53	
30	1,030	40	0	10.8	496	6.97	996	22.80	0.53	
35	1,036	40	0	11.0	492	6.96	1,000	22.60	0.53	
40	1,037	40	0	11.6	492	6.95	998	21.90	0.53	
45	1,042	40	0	12.2	489	6.97	999	22.20	0.53	
50	1,039	40	0	12.3	495	6.97	1,001	22.20	0.53	
55	1,041	40	0	13.4	498	6.96	997	22.10	0.54	
60	1,038	40	0	13.5	499	6.99	999	22.20	0.54	

De esta tabla podemos observar lo siguiente:

A los 5 minutos de ozonización, se obtuvo un valor de ozono libre de 0.28 mg/L con un valor de ORP de 786 mV.

A los 10 minutos de ozonización, se obtuvo un valor de ozono libre de 0.72 mg/L con un valor de ORP de 948 mV.

A los 15 minutos de ozonización, el valor de ozono libre se encontraba fuera del rango de detección, mayor a 0.75 mg/L, con un valor de ORP de 997 mV.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de ozono libre continuaba fuera de rango de detección, mayor a 0.75 mg/L, con un valor de ORP de 1,011 mV.

5.2. Proceso de ozonización de agua residual en condiciones “batch” (sin flujo).

5.2.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*

Estos ensayos preliminares fueron realizados para estudiar la evolución de los parámetros fisicoquímicos (medidas *in situ*) del agua residual (con tratamiento primario), luego de una ozonización a diferentes concentraciones de ozono.

A continuación, en la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos para la evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h durante 120 minutos de agua residual, a condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 10. Evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h de agua residual, a condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 120 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)
0	278	40	0	3.1	703	7.49	1,414	23.40	0.76
10	308	40	0	5.3	700	7.56	1,404	23.40	0.76
20	347	40	0	7.9	702	7.56	1,404	23.40	0.76
30	391	40	0	9.5	702	7.55	1,406	23.30	0.77
40	451	40	0	11.6	697	7.45	1,394	23.20	0.75
50	535	40	0	12.1	702	7.43	1,409	22.90	0.77
60	622	40	0	13.2	698	7.44	1,397	23.00	0.77
70	765	40	0	13.9	703	7.50	1,409	22.80	0.77
80	866	40	0	14.5	705	7.57	1,417	22.70	0.77
90	906	40	0	16.0	705	7.41	1,409	22.70	0.77
100	923	40	0	16.7	696	7.34	1,395	22.60	0.77
110	934	40	0	17.2	701	7.55	1,410	22.60	0.77
120	944	40	0	17.8	695	7.60	1,390	23.00	0.76

Todos estos parámetros fueron medidos *in situ* en el reactor de generación de ozono.

De los resultados, observamos ciertas tendencias en la evolución temporal de los siguientes parámetros fisicoquímicos: los sólidos totales disueltos (TDS) se mantienen casi sin variación, el pH fluctúa ligeramente entre 7.34 a 7.60, la conductividad electrolítica (CE) se mantuvo en el rango de 1,394 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1,417 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura se mantuvo en el rango de 22.6°C a 23.4°C.

El valor del ORP inicial fue de 278 mV, y aumentó hasta 622 mV luego de 60 minutos y llegando hasta 944 mV al cabo de 120 minutos.

Similar comportamiento mostró el O₂ disuelto (mg/L), cuyo valor inicial fue 3.1 mg/L y aumento hasta 13.2 mg/L luego de 60 minutos y llegando hasta 17.8 mg/L al cabo de 120 minutos de ozonización.

5.2.2. Estudio de la evolución del ozono libre medido *in situ*.

En las Tablas 11, 12 y 13, se muestra la evolución de los parámetros fisicoquímicos y el ozono libre (mg/L) en el tanque de reacción, durante una ozonización a 20 g/h, 30 g/h y 40 g/h, respectivamente del agua residual, bajo condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 11. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 20 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 120 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Ozono Libre (mg/L)
0	275	20	0	3.2	620	6.80	1,236	22.30	0.67	
10	278	20	0	5.8	619	6.95	1,240	22.30	0.67	0.00
20	299	20	0	8.5	619	6.92	1,239	22.60	0.67	
30	308	20	0	10.1	616	6.99	1,228	22.70	0.67	
40	327	20	0	11.6	620	7.06	1,238	22.60	0.68	
50	365	20	0	13.1	620	7.01	1,238	22.10	0.68	
60	415	20	0	13.9	614	7.00	1,234	22.20	0.68	0.00

Para tiempos de 10 y 60 minutos de ozonización no se logró detectar ozono libre. El valor registrado fue de 0.00 mg/L.

Para una ozonización de 20 g/L se obtiene un valor de ORP de 415 mV a 60 minutos.

Tabla 12. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 30 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Ozono Libre (mg/L)
0	277	30	0	3.1	623	7.00	1,245	22.20	0.68	
10	297	30	0	5.8	623	7.04	1,246	22.40	0.68	
20	314	30	0	8.6	624	7.02	1,249	22.40	0.68	
30	439	30	0	10.0	617	7.03	1,233	22.70	0.68	0.00
40	544	30	0	11.6	622	7.05	1,247	22.40	0.68	
50	588	30	0	12.0	616	7.02	1,233	22.00	0.67	
60	624	30	0	14.0	621	7.06	1,253	22.10	0.69	0.00

Para tiempos de 30 y 60 minutos de ozonización no se logró detectar ozono libre (valor obtenido fue 0.00 mg/L)

Para una ozonización de 30 g/L se obtiene un valor de ORP de 624 mV a 60 minutos.

Tabla 13. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y ozono libre, durante una ozonización a 40 g/h, de agua residual bajo condiciones “batch” (sin flujo) para un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Ozono Libre (mg/L)
0	260	40	0	2.8	639	6.99	1,284	23.80	0.68	
10	276	40	0	5.4	638	7.03	1,275	23.40	0.69	
20	300	40	0	7.8	636	7.02	1,269	23.60	0.69	
30	410	40	0	10.7	636	7.03	1,275	23.60	0.68	0.00
40	520	40	0	11.6	631	7.03	1,269	23.40	0.69	
50	616	40	0	13.1	635	7.04	1,276	23.00	0.69	
60	690	40	0	14.0	634	7.05	1,274	23.30	0.68	0.00

Para tiempos de 30 y 60 minutos de ozonización no se logró detectar ozono libre (valor obtenido fue 0.00 mg/L).

Para una ozonización de 40 g/L se obtiene un valor de ORP de 690 mV a 60 minutos.

5.2.3 Estudio de la evolución de la turbidez

A continuación, en la Tabla 14, se presentan dos ensayos a condiciones de ozonización de 40 g/h durante 60 minutos en condiciones “batch” (sin flujo), haciendo ahora seguimiento a la evolución del parámetro de turbidez (NTU), ya que se apreciaba visualmente que dentro del reactor ocurría una clarificación muy notoria del agua residual.

En esta tabla se tiene valores iniciales de turbidez entre 7.00 NTU y 17.00 NTU, para estos dos ensayos, lo cual evidencia que la matriz tiene variabilidad en su proceso de tratamiento primario al registrarse valores diferentes de turbidez inicial.

Tabla 14. Evolución de los parámetros fisicoquímicos, durante la ozonización a 40 g/h del agua residual (monitoreo de la evolución de la turbidez) durante un periodo de 90 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	O3 g/h Aplicado	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)
0	291	40	0	3.0	691	7.23	1,384	22.80	0.74	7.00
10	312	40	0	5.5	679	7.28	1,362	24.30	0.73	4.21
20	333	40	0	8.4	682	7.28	1,365	23.40	0.74	3.70
30	359	40	0	10.7	676	7.29	1,354	23.30	0.72	3.28
40	452	40	0	12.1	650	7.29	1,288	23.70	0.72	2.70
50	536	40	0	14.1	674	7.32	1,350	23.50	0.72	2.54
60	634	40	0	15.1	672	7.32	1,345	23.20	0.72	2.21
Tiempo (min)	ORP interno (mV)	O3 g/h Aplicado	Flujo (L/min)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)
0	288	40	0	2.8	675	7.11	1,360	24.70	0.74	17.00
10	313	40	0	5.6	678	7.11	1,360	23.80	0.73	9.50
20	336	40	0	7.2	679	7.10	1,362	23.70	0.73	8.52
30	356	40	0	9.2	684	7.10	1,367	23.50	0.74	7.97
40	397	40	0	10.5	685	7.13	1,372	23.20	0.74	7.15
50	456	40	0	12.2	676	7.13	1,365	23.20	0.73	6.40
60	521	40	0	13.0	683	7.30	1,366	23.20	0.74	5.50

En la Figura 23, se muestra la gráfica de la evolución de la Turbidez (NTU), a una ozonización a 40 g/L durante 60 minutos en condiciones “batch” (sin flujo).

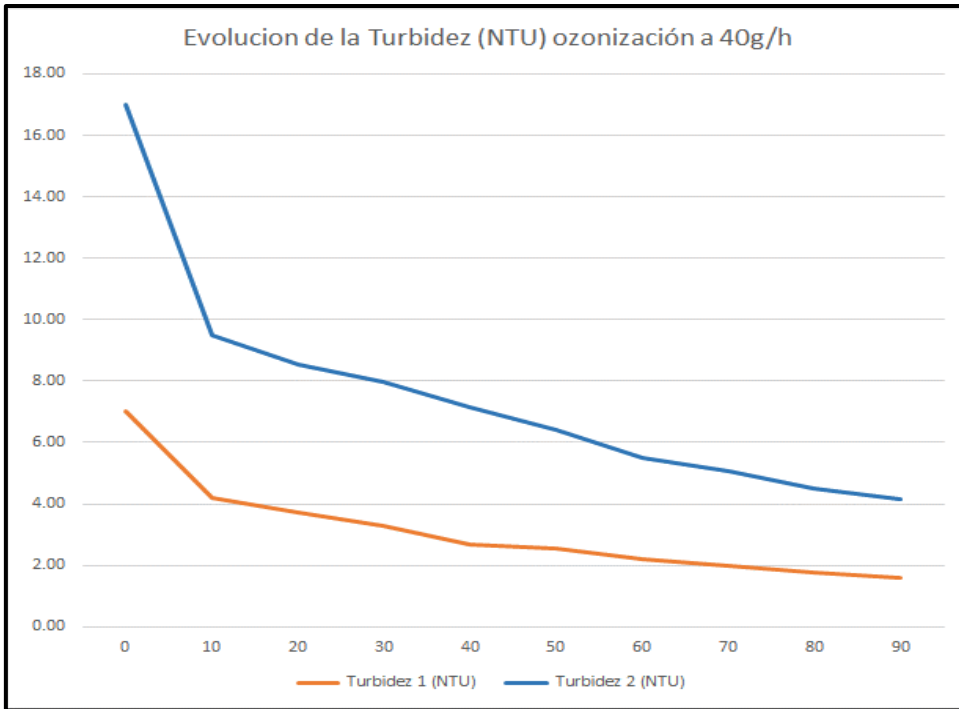


Figura 23. Evolución de la Turbidez (NTU) durante la ozonización a 40 g/h, a condiciones “batch” (sin flujo) durante 90 minutos.

A continuación, analizaremos el porcentaje de remoción de la turbidez (mostrado en la ecuación 5):

$$\text{Porcentaje de Remoción Turbidez} = 1 - (\text{Turbidez Final} / \text{Turbidez inicial}) \times 100\% \quad (5)$$

En la Tabla 15 podemos observar la remoción de la turbidez (respecto al valor inicial) para estos dos ensayos.

Tabla 15. Evolución de la remoción de la turbidez durante una ozonización a 40g/h por un periodo de 90 minutos.

Tiempo (min)	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Remocion Turbidez 1°	Remocion Turbidez 2°
0	7.00	17.00	0%	0%
10	4.21	9.50	40%	44%
20	3.70	8.52	47%	50%
30	3.28	7.97	53%	53%
40	2.70	7.15	61%	58%
50	2.54	6.40	64%	62%
60	2.21	5.50	68%	68%
70	2.00	5.06	71%	70%
80	1.75	4.50	75%	74%
90	1.60	4.16	77%	76%

La remoción de la turbidez se muestra en la gráfica de la Figura 24, para los ensayos realizados durante la ozonización a 40g/L durante 60 minutos.

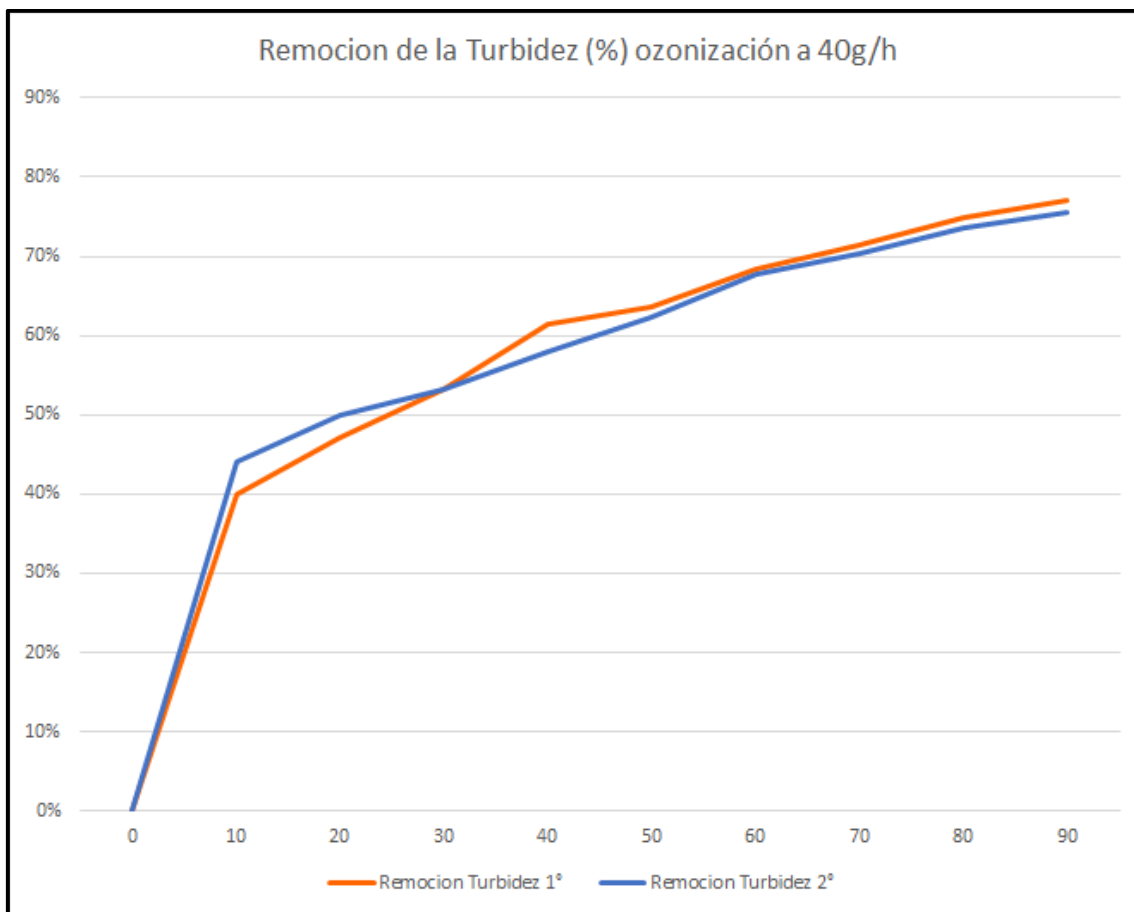


Figura 24. Remoción de la turbidez (%) al ozonizar a 40 g/h a condiciones “batch” (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.

5.2.4 Estudio de la evolución de los coliformes totales y termotolerantes

A continuación, se muestran ensayos donde se hará seguimiento a la evolución de los parámetros biológicos coliformes totales y coliformes termotolerantes.

En la Tabla 16, se muestran resultados de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, en una ozonización a 40 g/h durante 120 minutos en condiciones “batch” (sin flujo).

Tabla 16. Evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes aplicando una ozonización de 40 g/h por un periodo de 120 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)
0	282	40	0	160,000	92,000	3.2	713	7.20	1434	25.10	0.77	10.50
30	340	40	0	3,500	790	10.5	674	6.97	1360	23.40	0.74	8.50
60	497	40	0	79	33	14.0	678	6.98	1360	23.50	0.75	5.75
90	593	40	0	33	8	17.5	679	7.05	1357	24.90	0.73	3.44
120	693	40	0	5	2	18.4	674	7.10	1352	24.90	0.74	2.32

Las muestras se tomaron cada 30 minutos para observar la evolución de estos parámetros biológicos respecto a los valores de ORP, oxígeno disuelto y turbidez, ya que son los parámetros que sufren mayor variación en los ensayos.

La muestra inicial presentaba coliformes totales por 160,000 NMP/100 mL, coliformes termotolerantes por 92,000 NMP/100 mL, un ORP de 282 mV, oxígeno disuelto de 3.2 mg/L y una turbidez de 10.50 NTU.

Para los 30 minutos de ozonización se obtuvo valores de coliformes totales por 3,500 NMP/100 mL y coliformes termotolerantes por 790 NMP/100 mL, un ORP de 340 mV, oxígeno disuelto de 10.5 mg/L. y una turbidez de 8.50 NTU.

Para los 60 minutos de ozonización se obtuvo valores de coliformes totales por 3,500 NMP/100 mL y coliformes termotolerantes por 790 NMP/100 mL, ORP de 340 mV, oxígeno disuelto de 14.0 mg/L. y una turbidez de 5.75 NTU.

Para los 90 minutos de ozonización se obtuvo valores de coliformes totales por 33 NMP/100 mL, coliformes termotolerantes por 8 NMP/100 mL, un ORP de 593 mV, oxígeno disuelto de 17.5 mg/L. y una turbidez de 3.44 NTU.

Para los 120 minutos prácticamente los coliformes totales y termotolerantes se encuentran extintos.

A continuación, en la Tabla 17, se muestran resultados de dos ensayos de ozonización a 40 g/h durante 30 minutos haciendo seguimiento de la evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes, a una menor frecuencia de 10 minutos.

Tabla 17. Evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes aplicando una ozonización de 40 g/h durante 30 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)
0	271	40	0	5,400,000	5,400,000	2.7	724	7.23	1433	25.40	0.78	7.72
10	335	40	0	920,000	920,000	5.4	712	7.29	1427	25.50	0.78	6.76
20	371	40	0	22,000	22,000	7.4	718	7.29	1440	25.40	0.78	6.26
30	387	40	0	7,900	3,300	8.9	714	7.34	1428	25.20	0.78	5.70
Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)
0	242	40	0	2,200,000	1,100,000	3.1	689	7.10	1381	29.70	0.74	9.84
10	262	40	0			5.8	688	7.22	1362	27.10	0.74	7.55
20	293	40	0	350,000	79,000	7.7	681	7.21	1373	27.70	0.74	5.90
30	349	40	0	7,900	3,300	9.8	682	7.27	1363	27.70	0.74	4.88

Podemos observar que a partir de los 30 minutos se obtienen valores bajos para los coliformes totales (7,900 NMP/100 mL) y coliformes termotolerantes (3,300 NMP/100 mL) para ambos ensayos en condiciones batch (sin flujo).

Para el primer ensayo, se registraron valores iniciales de coliformes totales por 5,400,000 NMP/100 mL y coliformes termotolerantes por 5,400,000 NMP/100 mL, valores de ORP de 271 mV y oxígeno disuelto de 2.7 mg/L.

Para el segundo ensayo, se registraron valores iniciales de coliformes totales por 2,200,000 NMP/100 mL y coliformes termotolerantes por 1,100,000 NMP/100 mL, valores de ORP de 242 mV y oxígeno disuelto de 3.1 mg/L.

De acuerdo a los resultados se observando que luego de 30 minutos en ambos ensayos, ya se logra valores menores de 10,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes en condiciones batch (sin flujo).

Finalmente se elabora la Tabla 18 que muestra principalmente el porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes (CTT), para los tres ensayos anteriores.

Tabla 18. Porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes (CTT) en una ozonización a 40 g/h. en periodos de 30 y 120 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)
0	282	40	0	160,000	92,000	0.0%	3.2
30	340	40	0	3,500	790	99.1%	10.5
60	497	40	0	79	33	100.0%	14.0
90	593	40	0	33	8	100.0%	17.5
120	693	40	0	5	2	100.0%	18.4
Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)
0	271	40	0	5,400,000	5,400,000	0.0%	2.7
10	335	40	0	920,000	920,000	83.0%	5.4
20	371	40	0	22,000	22,000	99.6%	7.4
30	387	40	0	7,900	3,300	99.9%	8.9
Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)
0	242	40	0	2,200,000	1,100,000	0.0%	3.1
10	262	40	0				5.8
20	293	40	0	350,000	79,000	92.8%	7.7
30	349	40	0	7,900	3,300	99.7%	9.8

En los tres ensayos se logró un porcentaje de reducción de CTT del 99% a 30 minutos en una ozonización a 40 g/h.

Recordando que el volumen útil del tanque de reacción es de 1,700 litros, estos datos nos servirán para realizar los ensayos con flujo para el efluente.

5.3. Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo, aplicando dosis variables de ozono.

5.3.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes

Para estos ensayos se utilizará una nueva relación: **dosis de ozono (mg/L)** que viene a ser la cantidad de ozono que se introduce al reactor. Esta dosis nos indicará la cantidad de ozono aplicado por volumen de efluente que pasa por el tanque de reacción.

Un primer grupo de ensayos se llevaron a cabo con dosis variables de ozono, esto a flujo de efluente de 45 L/min y 50 L/min.

En las Tablas 19 y 20 se muestran los resultados obtenidos en estos ensayos. El tiempo total del ensayo fue de 150 minutos. En estas tablas también se dispone de columnas con las dosis de ozono en mg/L y porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes.

Tabla 19. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, en una ozonización variable a un flujo de efluente de 45 L/min por un periodo de 150 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)	Ozono Libre (mg/L)
0	297	12	45	4.44	540,000	540,000	0.00%	3.4	517	7.00	1,035	25.4	0.55	2.50	0.00
10	308	12	45	4.44				6.5	517	7.03	1,035	25.9	0.55	2.20	
20	319	12	45	4.44				6.9	517	7.05	1,032	25.7	0.55	2.16	
30	320	12	45	4.44	540,000	350,000	35.19%	7.1	517	7.09	1,035	26.3	0.55	2.10	
40	323	24	45	8.89				7.3	513	7.09	1,035	25.9	0.55	2.04	
50	326	24	45	8.89				7.5	514	7.12	1,027	26.2	0.55	2.03	
60	340	24	45	8.89	54,000	17,000	96.85%	7.7	519	7.12	1,039	26.3	0.55	2.00	0.00
70	347	40	45	14.81				8.1	520	7.15	1,046	26.1	0.55	1.95	
80	349	40	45	14.81				8.2	516	7.14	1,022	25.7	0.55	1.85	
90	350	40	45	14.81	79	33	99.99%	8.3	517	7.14	1,030	25.7	0.55	1.78	0.00
100	364	40	45	14.81				8.5	516	7.16	1,035	25.7	0.55	1.70	
110	380	40	45	14.81	790	490	99.91%	8.6	517	7.14	1,036	26.0	0.55	1.70	0.00
120	389	40	45	14.81				8.6	516	7.15	1,038	26.2	0.55	1.70	
130	392	40	45	14.81	110	49	99.99%	8.8	517	7.14	1,039	26.3	0.55	1.71	
140	395	40	45	14.81	79	49	99.99%	8.8	516	7.16	1,040	26.3	0.55	1.72	
150	401	40	45	14.81	79	33	99.99%	8.9	517	7.16	1,042	26.4	0.55	1.73	0.00

Se inició la ozonización a 12 g/h (dosis de 4.44 mg/L) durante 30 minutos. Luego se aumentó la velocidad de ozonización a 24 g/h (dosis de 8.89 mg/L), nuevamente por 30 minutos, y finalmente se aumentó la velocidad de ozonización a 40 g/h (dosis de 14.81 mg/L).

En ambos casos se puede ver la evolución de los parámetros fisicoquímicos, y en algunas muestras se evaluó el contenido de coliformes totales y termotolerantes.

Los resultados mostrados en la Tabla 19 muestran una matriz con valores de **540,000 NMP/100 mL de coliformes totales y termotolerantes**. Se obtiene valores del 99% de desinfección luego de 90 minutos de iniciado el proceso, a un **valor de ORP de 350 mV**, y con un **valor de oxígeno disuelto de 8.3 mg/L**. En este caso la matriz tenía una turbidez baja de 1.78 NTU.

Los parámetros TDS, pH, conductividad electrolítica, temperatura y salinidad no exhibieron variaciones apreciables.

Durante los 150 minutos que duró el ensayo no se obtuvo valor para el ozono libre.

Tabla 20. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, en una ozonización variable a un flujo de efluente de 50 L/min.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)	Ozono Libre (mg/L)
0	379	12	50	4.00	240,000	240,000	0.00%	3.2	459	7.00	920	28.0	0.48	13.50	0.00
10	386	12	50	4.00				6.2	459	7.02	920	28.2	0.48	13.20	
20	396	12	50	4.00				6.6	461	7.02	928	27.7	0.48	12.00	
30	398	12	50	4.00	130,000	130,000	45.83%	6.7	465	7.00	930	27.7	0.48	11.80	0.00
40	399	24	50	8.00				6.8	460	7.00	922	27.6	0.49	11.50	
50	400	24	50	8.00				6.9	464	7.00	928	28.0	0.49	11.30	
60	400	24	50	8.00	5,400	1,400	99.42%	7.0	465	7.00	931	27.8	0.49	11.00	0.01
70	400	40	50	13.33				7.1	465	7.04	927	27.8	0.49	10.40	
80	401	40	50	13.33				7.2	465	7.05	935	27.8	0.49	10.00	
90	402	40	50	13.33	5,400	790	99.67%	7.2	462	7.06	930	27.4	0.50	9.80	0.01
100	403	40	50	13.33	1,300	790	99.67%	7.2	464	7.10	928	27.6	0.50	9.50	
110	404	40	50	13.33				7.2	464	7.10	924	27.6	0.49	9.30	
120	403	40	50	13.33	16,000	2,800	98.83%	7.2	464	7.10	928	27.3	0.49	18.60	0.01
130	402	40	50	13.33	5,400	1,300	99.46%	7.3	463	7.12	924	27.4	0.49	15.60	
140	402	40	50	13.33	3,500	1,300	99.46%	7.3	461	7.13	928	27.6	0.49	13.50	
150	402	40	50	13.33	2,400	330	99.86%	7.4	461	7.11	927	27.3	0.49	11.30	

Se inició la ozonización de 12 g/h (dosis de 4.00 mg/L), durante 30 minutos. Luego se aumentó la cantidad de ozonización a 24 g/h (dosis de 8.00 mg/L) nuevamente por 30 minutos y finalmente se aumentó la velocidad de ozonización a 40 g/h (dosis de 13.33 mg/L).

En ambos casos se puede ver la evolución de los parámetros fisicoquímicos y en estos ensayos también se tomó muestras biológicas, puntualmente coliformes totales y termotolerantes en algunos puntos.

Los resultados mostrados en la Tabla 20 muestran una matriz con valores de **240,000 NMP/100 mL coliformes totales y termotolerantes**. Se obtiene valores del 99% de desinfección luego de 60 minutos de iniciado el proceso, a **un valor de ORP de 400 mV**. El **valor de oxígeno disuelto fue de 7.0 mg/L**. En este caso la matriz tenía una turbidez baja de 13.50 NTU.

Los parámetros TDS, pH, conductividad electrolítica, temperatura y salinidad no tuvieron variación apreciable.

A los 60, 90 y 120 minutos, a la salida del tanque se detectó ozono libre en trazas con valores de 0.01 mg/L.

5.4. Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo, aplicando dosis fija de ozono.

5.4.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes

Se realizó un segundo grupo de ensayos, utilizando la máxima velocidad de generación de ozono (40 g/h), esto a flujos del efluente a 30 L/min, 40 L/min y 50 L/min.

En la Tabla 21 se muestran los resultados del ensayo a una ozonización de 40 g/h, a un flujo de efluente de 30 L/min. dando como resultado una dosis de 22.22 mg/L de ozono.

Tabla 21. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 30 L/min por un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)	Ozono Libre (mg/L)
0	323	40	30	22.22	920,000	540,000	0.00%	4.1	381	7.00	763	26.8	0.40	10.00	0.00
10	332	40	30	22.22	22,000	17,000	96.85%	5.2	381	7.00	763	26.4	0.40	9.00	
20	344	40	30	22.22	4,900	4,900	99.09%	6.3	381	7.00	764	26.4	0.40	8.00	
30	354	40	30	22.22	2,200	1,700	99.69%	8.3	382	7.02	765	26.5	0.40	6.30	0.01
40	364	40	30	22.22				9.1	378	7.02	754	26.6	0.40	6.00	
50	365	40	30	22.22	790	330	99.94%	9.1	379	7.02	760	26.8	0.40	5.80	
60	381	40	30	22.22				10.0	379	7.02	758	26.5	0.40	5.70	0.01

De los resultados se obtiene un valor de dosis de ozono de 22.22 mg/L. Con esta dosis de ozono obtenemos valores de porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de mayores a 99% a los 20 minutos de iniciada la ozonización.

Partiendo de una muestra matriz que tiene 920,000 NMP/100 mL de coliformes totales y 540,000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes, a los 60 minutos, obtenemos una remoción de la turbidez del 43%. El valor de ORP aumento hasta 381 mV luego de los 60 minutos. A los 30 y 60 min, se detectó ozono libre en trazas con valores de 0.01 mg/L.

En la tabla 22 se muestran los resultados del ensayo a una ozonización de 40 g/h, a un flujo de efluente de 40 L/min. dando como resultado una dosis de 16.67 mg/L de ozono.

Tabla 22. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 40 L/min por un periodo de 70 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)	Ozono Libre (mg/L)
0	380	40	40	16.67	23,000	23,000	0.00%	2.2	464	6.96	930	28.1	0.49	13.90	0.00
10	384	40	40	16.67				6.2	465	6.97	934	27.7	0.49	7.50	
20	388	40	40	16.67	7,000	3,300	85.65%	8.0	466	6.99	927	27.6	0.49	7.00	
30	389	40	40	16.67	3,300	3,300	85.65%	8.3	465	7.00	932	27.4	0.49	6.50	0.00
40	392	40	40	16.67	3,300	2,300	90.00%	9.0	464	7.01	933	27.3	0.49	6.00	0.00
50	398	40	40	16.67				9.2	465	7.02	930	27.1	0.49	5.90	
60	399	40	40	16.67	2,400	2,400	89.57%	9.4	463	7.03	927	27.3	0.49	5.70	0.00
70	400	40	40	16.67				9.4	465	7.05	933	27.0	0.49	5.50	

De los resultados se obtiene un valor de dosis de ozono de 16.67 mg/L. Con esta dosis de ozono obtenemos valores de porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de mayores a 85% a los 20 minutos de iniciada la ozonización.

Partiendo de una muestra matriz que tiene 23,000 NMP/100 mL de coliformes totales y 23,000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes, a los 60 minutos obtenemos una remoción de la turbidez del 41%. El valor de ORP aumentó hasta 399 mV luego de los 60 minutos. Durante los 70 minutos que duró el ensayo no se pudo registrar un valor detectable para el ozono libre.

En la Tabla 23 se muestran los resultados del ensayo a una ozonización de 40 g/h, a un flujo de efluente de 50 L/min., dando como resultado una dosis de 13.33 mg/L de ozono.

De los resultados se obtiene un valor de dosis de ozono de 13.33 mg/L. Con esta dosis de ozono obtenemos valores de porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes mayores a 85% a los 20 minutos de iniciada la ozonización, que llega hasta un 97% a los 60 minutos.

Partiendo de una muestra matriz que tiene 920,000 NMP/100 mL de coliformes totales y 540,000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes, a los 60 minutos obtenemos una remoción de la turbidez del 27.5%. El valor de ORP aumentó hasta 396 mV luego de los

60 minutos. Durante los 70 minutos que duró el ensayo no se pudo registrar valores detectables para el ozono libre.

Tabla 23. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, durante una ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 50 L/min por un periodo de 70 minutos.

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	TDS (ppm)	pH	C.E. (uS/cm)	T° C (Celsius)	SAL (ppt)	Turbidez (NTU)	Ozono Libre (mg/L)
0	345	40	50	13.33	49,000	23,000	0.00%	2.5	480	6.90	960	27.4	0.49	12.00	0.00
10	354	40	50	13.33				6.0	480	6.90	960	27.2	0.49	6.00	
20	373	40	50	13.33	3,300	3,300	85.65%	6.3	480	6.96	960	27.2	0.49	5.70	
30	382	40	50	13.33	1,300	1,300	94.35%	6.5	454	6.97	926	28.4	0.49	5.60	0.00
40	388	40	50	13.33	1,700	1,700	92.61%	6.7	467	6.98	938	28.0	0.49	6.40	0.00
50	394	40	50	13.33				7.0	465	6.99	938	27.8	0.49	9.00	
60	396	40	50	13.33	490	490	97.87%	7.2	464	7.01	927	27.7	0.49	9.60	0.00
70	400	40	50	13.33				7.2	465	7.02	932	26.9	0.49	8.70	

5.5 Resultados de medición de SST, DQO, DBO y contenido de coliformes termotolerantes en muestras ozonizadas del agua residual.

En el proceso de ozonización del agua residual, se consideró como una condición crítica que el contenido de coliformes termotolerantes (CTT) esté **por debajo del nivel de 10,000 NMP/100 mL**. Para verificar este cumplimiento, se procedió a medir los siguientes parámetros del efluente: contenido de sólidos totales en suspensión (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), contenido de coliformes totales y de coliformes termotolerantes (CTT). Las muestras recolectadas fueron analizadas por terceros en Laboratorios SGS.

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos para un efluente representativo que ingresa a la PTAR sin tratamiento previo, y dan cuenta del nivel inicial de contaminación debido a la actividad biológica por parte de microorganismos presentes en el agua residual.

Tabla 24. Valores de SST, DQO, DBO y CTT de una muestra de agua residual sin tratamiento. (Laboratorios SGS).

Parámetros Medidos en Laboratorio	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	CTT (NMP/100ml)
Muestra Inicial	142.3	299.1	27.2	3'300,000

Estos valores muestran un elevado nivel de contaminación inicial del agua residual, que es objeto de tratamiento a lo largo de diversas etapas en la PTAR. Estudios previos realizados por operadores de la planta señalaron que el tratamiento terciario con cloro no lograba eliminar satisfactoriamente el contenido de coliformes termotolerantes (CTT), y por ello se propuso implementar una planta a escala piloto para estudiar la eficiencia mediante ozonización.

La Tabla 25 muestra los resultados al analizar estos cuatro parámetros de actividad microbiana (DBO, DQO, SST y CCT) al someter otra muestra del efluente mediante ozonización de 40 g/h durante 30 minutos. Los demás datos para este último efluente están registrados en la Tabla 17 (TDS, EC, pH, temperatura, salinidad, etc.).

Tabla 25. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para la ozonización a 40 g/h durante 30 min, sin flujo, de los ensayos registrados en la Tabla 17. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)
0	271	40	0	5,400,000	5,400,000	0.00%	2.7				
10	335	40	0	920,000	920,000	82.96%	5.4				
20	371	40	0	22,000	22,000	99.59%	7.4				
30	387	40	0	7,900	3,300	99.94%	8.9	<2.6	28.9 +/- 2.9	7 +/- 2	<1.8

De modo similar a la Tabla 25, en la Tabla 26 se complementan los resultados obtenidos (DBO, DQO, SST y CCT) en la Tabla 19, correspondiente a una ozonización de dosis variable (4.44 a 14.81 mg/L) a un flujo de 45 L/min para el efluente. Para la muestra tomada a 90 minutos, se procedió a medir los cuatro parámetros: DBO, DQO, SST y CCT.

Tabla 26. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 150 minutos de ozonización (a 12, 24 y 40 g/h) en agua residual a un flujo de 45 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 19. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CCT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)
0	297	12	45	4.44	540,000	540,000	0.00%	3.4				
10	308	12	45	4.44				6.5				
20	319	12	45	4.44				6.9				
30	320	12	45	4.44	540,000	350,000	35.19%	7.1				
40	323	24	45	8.89				7.3				
50	326	24	45	8.89				7.5				
60	340	24	45	8.89	54,000	17,000	96.85%	7.7				
70	347	40	45	14.81				8.1				
80	349	40	45	14.81				8.2				
90	350	40	45	14.81	79	33	99.99%	8.3	<3	<2.6	<4.5	<1.8
100	364	40	45	14.81				8.5				
110	380	40	45	14.81	790	490	99.91%	8.6				
120	389	40	45	14.81				8.6				
130	392	40	45	14.81	110	49	99.99%	8.8				
140	395	40	45	14.81	79	49	99.99%	8.8				
150	401	40	45	14.81	79	33	99.99%	8.9				

De modo similar a las Tabla 26, en la Tabla 27 se complementan los resultados obtenidos (DBO, DQO, SST y CCT) en la Tabla 20, correspondiente a una ozonización de dosis variable (4, 8 y 13.33 mg/L) a un flujo de 50 L/min para el efluente. Para la muestra tomada a 100 minutos, se procedió a medir los cuatro parámetros: DBO, DQO, SST y CCT.

Tabla 27. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 150 minutos de ozonización (a 12, 24 y 40 g/h) en agua residual a un flujo de 50 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 20. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CCT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)
0	379	12	50	4.00	240,000	240,000	0.00%	3.2				
10	386	12	50	4.00				6.2				
20	396	12	50	4.00				6.6				
30	398	12	50	4.00	130,000	130,000	45.83%	6.7				
40	399	24	50	8.00				6.8				
50	400	24	50	8.00				6.9				
60	400	24	50	8.00	5,400	1,400	99.42%	7.0				
70	400	40	50	13.33				7.1				
80	401	40	50	13.33				7.2				
90	402	40	50	13.33	5,400	790	99.67%	7.2				
100	403	40	50	13.33	1,300	790	99.67%	7.2	17 +/- 4	<2.6	4.7	2.0
110	404	40	50	13.33				7.2				
120	403	40	50	13.33	16,000	2,800	98.83%	7.2				
130	402	40	50	13.33	5,400	1,300	99.46%	7.3				
140	402	40	50	13.33	3,500	1,300	99.46%	7.3				
150	402	40	50	13.33	2,400	330	99.86%	7.4				

De modo similar a las Tabla 27, en la Tabla 28 se complementan los resultados obtenidos (DBO, DQO, SST y CCT) en la Tabla 21, correspondiente a una ozonización a 40 g/h para dosis de 22.22 mg/L y un flujo de 30 L/min en el efluente. Para la muestra tomada a 30 minutos, se procedió a medir los cuatro parámetros: DBO, DQO, SST y CCT.

Tabla 28. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 22.22 mg/L en agua residual a un flujo de 30 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 21. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)
0	323	40	30	22.22	920,000	540,000	0.00%	4.1				
10	332	40	30	22.22	22,000	17,000	96.85%	5.2				
20	344	40	30	22.22	4,900	4,900	99.09%	6.3				
30	354	40	30	22.22	2,200	1,700	99.69%	8.3	9 +/- 2	2.8	15.2	<1.8
40	364	40	30	22.22				9.1				
50	365	40	30	22.22	790	330	99.94%	9.1				
60	381	40	30	22.22				10.0				

De modo similar a las Tabla 28, en la Tabla 29 se complementan los resultados obtenidos (DBO, DQO, SST y CCT) en la Tabla 22, correspondiente a una ozonización a 40 g/h para dosis de 16.67 mg/L y un flujo de 40 L/min en el efluente. Para la muestra tomada a 30 minutos, se procedió a medir los cuatro parámetros: DBO, DQO, SST y CCT.

Tabla 29. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 16.67 mg/L en agua residual a un flujo de 40 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 22. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)
0	380	40	40	16.67	23,000	23,000	0.00%	2.2				
10	384	40	40	16.67				6.2				
20	388	40	40	16.67	7,000	3,300	85.65%	8.0				
30	389	40	40	16.67	3,300	3,300	85.65%	8.3	9 +/- 2	<2.6	<4.5	2.0
40	392	40	40	16.67	3,300	2,300	90.00%	9.0				
50	398	40	40	16.67				9.2				
60	399	40	40	16.67	2,400	2,400	89.57%	9.4				
70	400	40	40	16.67				9.4				

De modo similar a las Tabla 29, en la Tabla 30 se complementan los resultados obtenidos (DBO, DQO, SST y CCT) en la Tabla 23, correspondiente a una ozonización a 40 g/h para dosis de 13.33 mg/L y un flujo de 50 L/min en el efluente. Para la muestra tomada a 30 minutos, se procedió a medir los cuatro parámetros: DBO, DQO, SST y CCT.

Tabla 30. Resultados de parámetros DBO, DQO, SST y CCT, para 30 minutos de ozonización (a 40 g/h) con dosis 13.33 mg/L en agua residual a un flujo de 50 L/min, de los ensayos registrados en la Tabla 23. (Laboratorios SGS).

Tiempo (min)	ORP interno (mV)	Ozono Aplicado (g/h)	Flujo (L/min)	Dosis de Ozono (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)	% Reducción CTT	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termo-tolerantes (NMP/100 mL)
0	345	40	50	13.33	49,000	23,000	0.00%	2.5				
10	354	40	50	13.33				6.0				
20	373	40	50	13.33	3,300	3,300	85.65%	6.3				
30	382	40	50	13.33	1,300	1,300	94.35%	6.5	9 +/- 2	<2.6	<4.5	2.00
40	388	40	50	13.33	1,700	1,700	92.61%	6.7				
50	394	40	50	13.33				7.0				
60	396	40	50	13.33	490	490	97.87%	7.2				
70	400	40	50	13.33				7.2				

5.6 Propuesta de un modelo matemático para la descripción del comportamiento de la desinfección con ozono, en un monitoreo *in situ*.

Resulta muy difícil medir la demanda química de oxígeno, DQO(t), en tiempo real, siendo esta una variable muy importante en el proceso de ozonización a aplicarse en el agua residual.

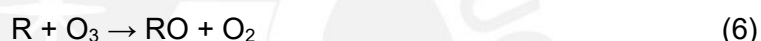
Introduciendo varios parámetros de calidad del agua que forman parte de ecuaciones diferenciales, Street y Phelps propusieron en 1925 un modelo para describir la evolución del contenido de oxígeno en el río Ohio (EE.UU.) mediante mediciones durante un año entero (Orlob 1983).

Este modelo ha sido progresivamente mejorado, ampliado y ajustado para otros sistemas de estudio, tales como el modelo IMPACT (International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade) en la irrigación de agua para agricultura, y el modelo IDWR (Idaho Department of Water Resources) para la provisión de agua doméstica (Rauschenbach 2016). Sin embargo, todos estos modelos requieren

ser ajustados con varios parámetros y durante períodos prolongados en el orden de meses de estudio. En la presente investigación en la PTAR de SEDAPAL en Cieneguilla, se cuenta con un número menor de parámetros de calidad del agua que se pueden medir, y se tiene por objetivo estimar valores de DQO en tiempos mucho más cortos: en el orden de minutos de ozonización [36][37].

En esta sección se propone un método de estimación de DQO(t), el cual se basa en modelos de cinética química, balance de masas y ajuste de datos dentro de funciones sigmoidales. A continuación, se describe el fundamento de este método de estimación de DQO(t), tomando como ejemplo los datos provistos en la Tabla 17.

El proceso de ozonización, llevado a cabo al interior del tanque con agua residual, implica múltiples reacciones químicas que compiten entre sí. Si bien esta descripción es bastante compleja, en este modelo se propone la siguiente simplificación, reducida únicamente a la reacción (ecuación 6):



En la ecuación química anterior, R representa a los contaminantes presentes en el agua residual, y RO a las formas oxidadas de estos contaminantes.

Considerando la ozonización bajo condiciones “batch” en un tanque con 1,700 Litros de agua residual, en función del tiempo (t) se plantean las ecuaciones de balance de masas, expresadas en términos:

- Del oxígeno que ingresa en forma de ozono $[O_3]_{AR-ingresso}(t)$ aplicado al agua residual (AR);
- Del oxígeno que sale del tanque donde se va ozonizar al agua residual, expresado como $[O_2]_{(AR-salida)}(t)$;
- De la concentración de los contaminantes que ingresan al tanque $[R](t)$ y;
- De su forma oxidada al interior del tanque, $[RO](t)$.

Planteando el balance de masas para el oxígeno al interior del tanque, se tiene la siguiente ecuación (7):

$$[O_3]_{AR-ingresso}(t) = [RO] + [O_2]_{(AR-salida)}(t) - [O_2]_{(inicial)} \quad (7)$$

Dado que para 100% de ozonización la velocidad de generación de ozono es de 40 g/h, se plantea que:

$$(40 \text{ g/h}) * t (\text{min}) / 1700 \text{ L} = 0.392 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1} * t(\text{min}) ;$$

entonces:

$$[\text{O}_3]\text{AR-ingreso}(t) = 0.392 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1} * t(\text{min}) \text{ para } 100\% \text{ de ozonización}$$

Por lo tanto:

$$[\text{RO}](t) = 0.392 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1} * t(\text{min}) - [\text{O}_2](\text{AR-salida}(t) + [\text{O}_2](\text{inicial}).$$

A continuación, en las primeras cuatro columnas de la Tabla 31, se reportan los tiempos de ozonización, valores medidos de ORP(interno) y $[\text{O}_2](\text{AR-salida}(t)$, así como el $[\text{O}_3]\text{AR-ingreso}(t)$ aplicado en función del tiempo.

Estos valores corresponden al agua residual ozonizada a 40 g/h bajo condiciones "batch" (sin flujo). Para estas mediciones, $[\text{O}_2](\text{inicial}) = 2.7 \text{ mg/L}$.

Tabla 31. Estimación en el tiempo del contenido de contaminantes oxidados y de la demanda química de oxígeno del agua residual tratada a una ozonización de 40 g/h, bajo condiciones batch (sin flujo) por un periodo de 60 minutos.

Tiempo (min)	ORP (int) (mV)	$[\text{O}_2](\text{AR-salida})$	$[\text{O}_3](\text{AR-ingreso})$	$[\text{RO}](t)$	$[\text{RO-NL}](t)$	DQO(t) calculado	Eficiencia en remoción de DQO	DQO (mg/L) (%remoción)
0	271	2.7	0	0	0	243.30	0.00	31.2 (0%)
10	335	5.4	3.92	1.22	1.3157	241.98	0.54	
20	371	7.4	7.84	3.14	3.1400	240.16	1.29	
30	387	8.9	11.76	5.56	5.1827	238.11	2.13	28.9 (7.37%)
40	409	11.6	15.68	6.78	7.3658	235.93	3.03	
50	439	12.3	19.60	10.00	9.6465	233.65	3.96	
60	482	14.3	23.52	11.92	11.9970	231.30	4.93	

Con los valores del contaminante oxidado en función del tiempo $[\text{RO}](t)$, quinta columna de la Tabla 31, se realizó un ajuste de estos valores con los tiempos tabulados en la primera columna.

El ajuste aplicado corresponde a una función no lineal del tipo sigmoideal, caracterizado por cuatro parámetros.

Esta correlación se ajusta bastante bien a la siguiente función ($R = 0.9947$), la cual es evaluada en la sexta columna de la Tabla 30, y expresada como $[RO-NL](t)$:

$$[RO-NL](t) = 243.2955 + (-0.02778962-243.2955) / [1 + (t(\text{min})/640.8395)^{1.2484}];$$

$R = 0.9947$ mediante ajuste sigmoïdal de cuatro parámetros logísticos.

En la gráfica de la Figura 25 se muestra la curva de esta función respecto al tiempo. Aquí también se aprecia una buena coincidencia entre los valores de las columnas cinco y seis de la Tabla 31. La mayor variación se da en tiempo igual a 40 minutos (valor de 0.5858)



Figura 25. Estimación en función del tiempo, $t(\text{min})$, del contenido de contaminantes oxidados (mg/L) mediante la ozonización.

Los puntos rojos corresponden a $[RO](t)$ determinados mediante balance de masas, y la curva en negro representa la curva de ajuste sigmoïdal, $[RO-NL](t)$.

Esta última función, $[RO-NL](t)$, converge al valor de 243.2955 mg/L para tiempo infinito y, dentro del modelo planteado, representa el valor inicial de la demanda química de oxígeno en la muestra de agua residual. Con este valor, se puede estimar los demás valores de DQO en función del tiempo, restando 243.2955 mg/L menos los valores de $[RO-NL](t)$ en la columna seis de la Tabla 31. De esta forma se obtuvo la estimación de $DQO(t)$ en la séptima columna, así como la eficiencia porcentual en la remoción del DQO (penúltima columna).

Para este ensayo se cuenta con valores experimentales de DQO inicial (31.2 mg/L) y a los 30 minutos de tratamiento (28.9 mg/L), por lo que la eficiencia esperada de remoción de DQO sería de 7.37% al cabo de 30 minutos de ozonización.

Así, por ejemplo, se estima inicialmente que el agua residual contenía un valor de DQO de 243.2966 mg/L, y que al cabo de 30 minutos se redujo en 2.13% a 238.1127 mg/L. Estos valores estimados difieren en un orden de magnitud respecto a los que se midieron experimentalmente en Laboratorios de SGS, 31.2 a 28.9 mg/L, pero concuerdan cercanamente en cuanto al porcentaje de remoción del DQO (7.37%).

Las diferencias entre valores absolutos de DQO (últimas tres columnas de la Tabla 31) se deberían a la simplificación del modelo en la oxidación de un único contaminante R a RO, en lugar de considerar múltiples contaminantes, y en no considerar la descomposición del ozono a O₂.

Este último factor se puede corregir aplicando el mismo método desarrollado a los valores para el agua potable, Tabla 9. En los cálculos preliminares se logra mejorar este cálculo en casi 10%.

También debe considerarse que el nivel de ozono medido a la salida del tanque fue bastante bajo, y se registró por debajo del límite de detección del fotómetro. Mediciones experimentales más sensibles también contribuirían a mejorar los resultados de este modelo.

A lo largo de todos los ensayos de ozonización, tanto en agua residual como potable, los valores de ORP(interno) funcionaron como un indicador cualitativo de la capacidad de oxidación al interior del tanque. En esta última sección se verifica una buena correlación del DQO estimado mediante el modelo anterior respecto a los valores medidos de ORP(interno).

Nuevamente se aplicó una función de ajuste sigmoïdal de cuatro parámetros logísticos, arrojando un coeficiente de correlación de R = 0.998:

$[DQO](t)(mg/L) = 230.0518 + (243.3651 - 230.0518) / [1 + (ORP-int(mV)/391.4598)^{10.7418}]$;
R = 0.998 mediante ajuste sigmoïdal de cuatro parámetros logísticos.

En la Figura 26, se grafica esta función que correlaciona los valores estimados de DQO con aquellos medidos de ORP(interno).

En los métodos de regresión sigmooidal aplicados, se recurre a cuatro parámetros logísticos (4PL): estos son los puntos correspondientes al valor máximo, mínimo, al punto de inflexión (asignado mediante el punto medio entre ambos valores anteriores) y la pendiente en este último punto. Además de obtener valores de coeficiente de regresión cercanos a 1, la elección de este método de regresión se basa en la conocida ecuación de Nernst, que relaciona medidas de voltaje con concentraciones de especies activas en las reacciones de óxido-reducción. En el caso estudiado, el voltaje medido se relaciona con el valor interno del ORP, y la concentración de las especies oxidables con la demanda química de oxígeno (DQO).



Figura 26. Estimación durante la ozonización de la demanda química de oxígeno, DQO (mg/L) respecto a los valores medidos de ORP(interno) (mV).

Los puntos rojos corresponden a los valores de DQO(t) determinados para las mediciones experimentales de ORP(interno), y la curva en negro representa a la curva de ajuste sigmooidal de DQO(t) respecto al ORP(interno).

Analizando los resultados de la Tabla 24 (para agua residual sin tratamiento), se observa que el valor inicial de DQO determinado por Laboratorio SGS es de 299 mg/L, lo cual se acerca más en orden de magnitud al valor estimado de 243 mg/L, obtenido mediante el presente modelo propuesto.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Proceso de ozonización de agua potable en condiciones “batch” (sin flujo).

6.1.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*.

Se aprecia que la medición del ORP interno muestra un comportamiento más estable que la medición del ORP externo, es decir, a la salida del reactor. Esto se puede deber a fenómenos de transporte del ozono disuelto, y que al interior del tanque el ozono se encuentra bajo mejores condiciones de equilibrio de disolución; mientras que, en la parte externa del tanque, aun no se ha alcanzado tal equilibrio de disolución y el ozono se evapora al aire. Esta tendencia también se observaría luego en la ozonización del agua residual, y concuerda con los valores muy bajos de ozono disuelto que se mide a la salida de su ozonización.

Para los ensayos previos con agua potable, donde se realizaron mediciones de la evolución de los parámetros fisicoquímicos (medidos *in situ*) luego de una ozonización a velocidades de ozonización de 20 g/h, 30 g/h y 40 g/h en condiciones “batch” (sin flujo), se registraron valores iniciales de ORP en el rango de 558 mV a 590 mV para el agua potable. Debido a la ausencia de bacterias en estas muestras, una vez iniciada la ozonización, en los tres ensayos los valores de ORP aumentaron rápidamente su valor por encima de 900 mV, según los resultados de las Tablas 5, 6 y 7. Se alcanzaron valores de ORP entre los 1,060 mV a 1,070 mV, luego 60 minutos de ozonización, como se muestran en las Figuras 16, 18 y 20.

Otro parámetro que evoluciona notoriamente es el oxígeno disuelto. En los tres casos aumenta significativamente desde valores iniciales en el rango de 5.3 mg/L a 5.7 mg/L, llegando a valores de 13.5 mg/L a 15.0 mg/L luego de 60 minutos de ozonización.

Para estos ensayos se puede considerar que los demás parámetros fisicoquímicos monitoreados en el tiempo varían mínimamente durante los períodos de ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

De estos ensayos se puede tener como conclusión que el ORP y el oxígeno disuelto aumentan con el progreso de la ozonización a condiciones batch (sin flujo).

6.1.2 Estudio de la evolución del ozono libre medido *in situ*.

Los resultados en Tabla 8 y Tabla 9 muestran la evolución de los parámetros fisicoquímicos, así como de la medición *in situ* del ozono libre (mg/L). La ozonización fue de 30 g/h y 40 g/h, durante 60 minutos. Estos ensayos se realizaron con la finalidad de monitorear la evolución del parámetro de ozono libre O₃ (mg/L), y con ello cuantificar el contenido de ozono disponible en el reactor para la degradación oxidativa.

Se obtuvo resultados de ozono libre en tiempos de 5 y 10 minutos de ozonización para ambos ensayos de 30 g/h y 40g/h, respectivamente.

Para el ensayo realizado a 30g/h, se muestra que a los 5 minutos de ozonización se obtuvo un valor de ozono libre de 0.32 mg/L con un valor de ORP de 799 mV a los 10 minutos de ozonización. También se obtuvo un valor de ozono libre de 0.62 mg/L con un valor de ORP de 959 mV a los 15 minutos de ozonización. Sin embargo, el valor de ozono libre se encontraba ya fuera de rango (mayor a 0.75 mg/L) al llegar a un valor de ORP de 1,010 mV.

Para el ensayo realizado a 40g/h, se muestra que a los 5 minutos de ozonización, se obtuvo un valor de ozono libre de 0.28 mg/L con un valor de ORP de 786 mV a los 10 minutos de ozonización. También se obtuvo un valor de ozono libre de 0.72 mg/L con un valor de ORP de 948 mV a los 15 minutos de ozonización. Sin embargo, el valor de ozono libre se encontraba ya fuera de rango (mayor a 0.75 mg/L) con un valor de ORP de 997 mV.

De estos resultados podemos predecir que, para valores de ORP mayores a 640 mV, es probable detectar ozono libre en el tanque de reacción.

6.2 Proceso de ozonización de agua residual en condiciones “batch” (sin flujo).

6.2.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ*.

Estos ensayos fueron realizados en la PTAR de SEDAPAL en Cieneguilla.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 10, se obtiene la evolución de los parámetros fisicoquímicos durante la ozonización a 40 g/h del agua residual a condiciones “batch” (sin flujo).

Se midieron los parámetros fisicoquímicos *in situ*: ORP, oxígeno disuelto, TDS, pH, CE, temperatura y salinidad. En estas mediciones se partió inicialmente de un ORP de 278 mV y 3.1 mg/L de oxígeno disuelto 3.1 mg/L. En esta serie, la evolución de estos dos últimos parámetros en agua residual fue similar al comportamiento con agua potable.

Esta serie de ozonización se completó hasta los 120 minutos. A los 60 minutos, se alcanzaron los valores de 622 mV y 13.2 mg/L para el ORP y oxígeno disuelto, respectivamente. Para los 120 minutos de ozonización, se llegaron a valores de 944 mV y 17.8 mg/L para el ORP y el oxígeno disuelto, respectivamente. Debido a los resultados obtenidos hasta 120 minutos de prueba, se decidió acortar los períodos de ozonización a períodos menores a 60 minutos.

Nuevamente se confirmó que los demás parámetros fisicoquímicos (aparte de ORP y oxígeno disuelto) exhibían variaciones mínimas de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

Con los resultados de estos ensayos se analizará el comportamiento del ORP y oxígeno disuelto durante la ozonización de agua residual.

6.2.2 Estudio de la evolución del ozono libre medido *in situ*, durante la ozonización de agua residual, en condiciones “batch” (sin flujo).

En las Tablas 11, 12 y 13, se presenta la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y el ozono libre (mg/L) en el tanque de reacción, bajo condiciones “batch” (sin flujo), en un tiempo máximo de ozonización de 60 minutos.

Para el ensayo realizado a una ozonización de 20 g/h (Tabla 11) se obtiene un valor máximo de 415 mV para el ORP y oxígeno disuelto hasta 14.2 mg/L, luego de 60 minutos. En este ensayo no se detectó ozono libre a los 10 y a los 60 minutos de ozonización.

Para el ensayo realizado a una ozonización de 30 g/h (Tabla 12) se obtiene un valor máximo de 624 mV para el ORP y oxígeno disuelto hasta 14.0 mg/L, luego de 60 minutos. En este ensayo no se detectó ozono libre a los 30 y a los 60 minutos de ozonización.

Para el ensayo realizado a una ozonización de 40 g/h (Tabla 13) se obtiene un valor máximo de 690 mV para el ORP y oxígeno disuelto hasta 14.0 mg/L, luego de 60 minutos. En este ensayo no se detectó ozono libre a los 30 y a los 60 minutos de ozonización.

Por lo que podemos afirmar que para el agua residual luego de una ozonización a 40g/h por 60 minutos no se detectó ozono libre.

En ninguno de los tres ensayos realizados a 20 g/h, 30 g/h y 40 g/h de ozonización (Tablas 11, 12 y 13, respectivamente), se detectó ozono libre durante los 60 minutos del proceso. Según los ensayos con agua potable mostrados en las Tablas 8 y 9, se tendría lectura de ozono libre a valores de ORP superiores a los 780 mV. Los valores de ORP obtenidos fueron 415 mV, 615 mV y 690 mV respectivamente y, como era de esperarse, a mayor cantidad de ozono liberado en el reactor, se obtendrá un mayor valor de ORP, ya que se habrá eliminado mayor cantidad de contaminantes. La concentración de oxígeno disuelto si fue muy similar para los tres ensayos 13.9 – 14.0 mg/L.

6.2.3 Estudio de la evolución de la Turbidez (*in situ*), durante la ozonización de agua residual, en condiciones “batch” (sin flujo).

En la Tabla 14 se hace un seguimiento *in situ* de la turbidez (NTU) en el agua residual, al realizar la ozonización a 40 g/h durante 60 minutos en condiciones “batch” (sin flujo). En la tabla se registra los ensayos para dos ensayos.

Para el primer ensayo, se tuvo valores de 634 mV para ORP, 15.1 mg/L para oxígeno disuelto y 2.21 NTU para la turbidez, luego de 60 minutos de ozonización.

Para el segundo ensayo, se tuvo valores de 521 mV para ORP, 13.0 mg/L para oxígeno disuelto, y 5.50 NTU para la turbidez luego de 60 minutos de ozonización.

Los demás parámetros fisicoquímicos medidos muestran una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

En ambos ensayos (Tabla 14) se aprecia un comportamiento decreciente de la turbidez, como se muestra en la Figura 23. Esta evolución de la turbidez (NTU) durante la ozonización a 40 g/h se realizó por 90 minutos a condiciones “batch” (sin flujo).

También apreciamos que la turbidez inicial en ambos ensayos es diferente: 7 NTU y 17 NTU. Esto muestra que las características de la muestra con tratamiento primario también se manejan en un rango amplio.

Analizando los resultados de ambos ensayos, se ha calculado (Tabla 15) el porcentaje de remoción. Aquí se observa que para ambos ensayos se tienen un comportamiento similar para la remoción de la turbidez de 77-76%, luego de 60 minutos de ozonización a 40 g/h.

Estos ensayos nos van dando una idea del nivel de remoción de la turbidez que se obtendría a diferentes tipos de turbidez iniciales, las cuales son muy variables.

6.2.4 Estudio de la evolución de los coliformes totales y termotolerantes, durante la ozonización de agua residual, en condiciones “batch” (sin flujo).

Respecto a los resultados de la Tabla 16, se muestran la evolución de los parámetros fisicoquímicos y los resultados de coliformes totales y termotolerantes, en una ozonización a 40 g/h durante 120 minutos en condiciones “batch” (sin flujo).

Para la muestra inicial (tiempo inicial igual a cero), se obtuvo un valor de 160,000 NMP/100 mL de coliformes totales y 92,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, con un valor de ORP de 282 mV y oxígeno disuelto de 3.2 mg/L.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 3,500 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes se redujo hasta 790 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 340 mV y oxígeno disuelto de 10.5 mg/L.

A los 60 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 79 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes se redujo hasta 33 NMP/100 mL, un valor de ORP de 497 mV y oxígeno disuelto de 14.0 mg/L.

A los 90 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 33 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes se redujo hasta 8 NMP/100 mL, un valor de ORP de 593 mV y oxígeno disuelto de 17.5 mg/L.

A los 120 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 5 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes se redujo hasta 2 NMP/100 mL, un valor de ORP de 693 mV y oxígeno disuelto de 18.4 mg/L.

De estos resultados mencionados, se puede observar que, a partir de los 30 minutos de ozonización, ya se obtuvo valores por debajo de los 10,000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes, también se observa que luego de los 30 min de proceso el valor del ORP se incrementa notoriamente.

Los demás parámetros fisicoquímicos medidos en estos ensayos exhibieron una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

Con estos resultados se procede a realizar ensayos a un menor tiempo de ozonización. Se considera un nivel aceptable de desinfección para una población de coliformes termotolerantes para aguas residuales tratadas según la normativa local (Tabla 2).

En la Tabla 17, se muestran los resultados de dos ensayos de ozonización a 40 g/h durante 30 min, haciendo un seguimiento de la evolución de los coliformes totales y coliformes termotolerantes a una frecuencia de 10 minutos para la toma de muestras. Para el primer ensayo, la muestra inicial (tiempo inicial cero) registró 5'400,000 NMP/100 mL para coliformes totales y 5'400,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, con un valor de ORP de 271 mV y oxígeno disuelto de 2.7 mg/L.

A los 10 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 920,000 NMP/100 mL y para el caso de los coliformes termotolerantes NMP/100 mL también 920,000, con un valor de ORP de 335 mV y oxígeno disuelto de 5.4 mg/L.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 22,000 NMP/100 mL y para el caso de los coliformes termotolerantes también 22,000 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 371 mV y oxígeno disuelto de 7.4 mg/L.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 7,900 NMP/100 mL y para el caso de los coliformes termotolerantes de 3,300 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 387 mV y oxígeno disuelto de 8.9 mg/L.

La remoción de la turbidez en este ensayo llegó a 26,2% en 30 minutos.

Los demás parámetros medidos (Tabla 17) exhibieron una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

Para el segundo ensayo, la muestra inicial (tiempo inicial cero) registró 2'200,000 NMP/100 mL para coliformes totales y 1'100,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, con un valor de ORP de 242 mV y oxígeno disuelto de 3.1 mg/L.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 350,000 NMP/100 mL y para el caso de los coliformes termotolerantes también 79,000 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 293 mV y oxígeno disuelto de 7.7 mg/L.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 7,900 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes de 3,300 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 349 mV y oxígeno disuelto de 9.8 mg/L.

La remoción de la turbidez en este ensayo llegó a 50.4% en 30 minutos.

Los demás parámetros medidos (Tabla 17) exhibieron una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad.

Con estos resultados se puede decir que, luego de una ozonización a 40 g/h por 30 minutos, **se obtienen valores de ORP mayores a 387 mV, valores de coliformes termotolerantes menores a 10,000 NMP/100 mL**, y porcentajes de reducción de coliformes termotolerantes mayores al 99%, todo esto realizado en condiciones "batch" (sin flujo). El valor de ORP aumenta debido a la disminución de coliformes ya que, por ser un sistema "batch" (sin flujo), no hay más ingreso de agua residual y, por lo tanto, la concentración de oxígeno disuelto aumenta. Estos resultados nos muestran las condiciones de partida para continuar con el estudio, a condiciones de flujo de agua residual.

6.3 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes, durante la ozonización de agua residual, en condiciones de flujo, aplicando dosis variables de ozono.

La dosis de ozono (mg/L) es la cantidad de ozono liberado en el reactor respecto al flujo de efluente que pasa por este.

Un primer grupo de ensayos se realizaron variando la dosis de ozonización. Estas dosis fueron evaluadas a dos flujos de efluentes: 45 L/min y 50 L/min.

En la Tabla 19 y Tabla 20 se tienen resultados de los ensayos realizados bajo las siguientes condiciones: Se inició la ozonización de 12 g/h (4.44 mg/L) durante 30 minutos. Luego se aumentó la velocidad de ozonización a 24 g/h (8.89 mg/L) nuevamente por 30 minutos. Finalmente se aumentó la velocidad de ozonización a 40 g/h (14.81 mg/L).

En ambos casos (Tabla 19 y 20) se verifica la evolución de los parámetros fisicoquímicos. En estos ensayos también se procedió a medir el contenido de coliformes totales y termotolerantes en algunos puntos.

La idea de tomar dosis variables fue de seguir la evolución de los coliformes totales y termotolerantes respecto al ORP y oxígeno disuelto.

Los resultados de la Tabla 19, muestran una muestra inicial (tiempo cero) con valores de 540,000 NMP/100 mL para coliformes totales, 540,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, 297 mV para ORP y 3.4 mg/L para oxígeno disuelto.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales sigue igual a 540,000 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 350,000 NMP/100 mL, el valor de ORP fue 320 mV, y para el oxígeno disuelto fue 7.1 mg/L.

A los 60 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuye hasta 54,000 NMP/100 mL, y el valor de coliformes termotolerantes también disminuye a 17,000 NMP/100 mL, el valor del ORP fue 340 mV y para el oxígeno disuelto fue 7.7 mg/L. Ambos parámetros aumentaron sus valores respecto a los medidos a 30 minutos.

A los 90 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 79 NMP/100 mL, y para los coliformes termotolerantes de 33 NMP/100 mL, con valores de ORP de 350 mV y oxígeno disuelto de 8.3 mg/L.

Para tiempo mayores a 90 minutos de ozonización se obtuvieron valores de coliformes totales y termotolerantes menores a 1,000 NMP/100 mL, con porcentajes de remoción de coliformes termotolerantes mayores a 99.9%, con un valor de ORP máximo de 400 mV, oxígeno disuelto 8.9 mg/L y porcentaje de remoción de la turbidez de 32%.

Los demás parámetros medidos, tuvieron una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad. Durante los 150 minutos que duró el ensayo no se logró detectar el contenido de ozono libre.

Los resultados mostrados en la Tabla 20, muestran una muestra inicial (tiempo cero) con valores de 240,000 NMP/100 mL para coliformes totales, y 240,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, con un valor de ORP de 379 mV y 3.2 mg/L para el oxígeno disuelto.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales sigue igual a 130,000 NMP/100 mL, y para el caso de coliformes termotolerantes disminuyó a 130,000 NMP/100 mL, y con valores de ORP de 398 mV y oxígeno disuelto de 6.7 mg/L.

A los 60 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó hasta 5,400 NMP/100 mL y el valor de coliformes termotolerantes también disminuyó a 1,000 NMP/100 mL, con valores de ORP de 402 mV y oxígeno disuelto de 7.0 mg/L.

A los 90 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales se mantuvo en 5,400 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyó a 790 NMP/100 mL, con valores de ORP de 402 mV y oxígeno disuelto de 7.2 mg/L.

Para tiempo mayores a 90 minutos de ozonización, se obtuvieron valores de coliformes termotolerantes menores a 10,000 NMP/100 mL y porcentajes de remoción de coliformes termotolerantes mayores a 99.9%, con un valor de ORP máximo de 402 mV, oxígeno disuelto 7.4 mg/L, y porcentaje de remoción de la turbidez de 32%.

Los demás parámetros medidos tuvieron una variación mínima de sus valores durante la ozonización: sólidos totales disueltos (TDS), valor pH de la acidez, conductividad electrolítica (CE), temperatura y salinidad. Durante los 90, 120 y 150 minutos que duró el ensayo, la lectura de ozono libre fue de 0.01 mg/L (trazas). Esto indicaría que el ozono se agota al reaccionar al interior del tanque. La obtención de valores máximos aproximados de 400 mV de ORP nos indica que la dosis de ozono está reaccionando con los contaminantes presentes, donde el ozono se consume significativamente al degradar la cantidad de coliformes en el agua tratada.

6.4 Proceso de ozonización de agua residual en condiciones de flujo aplicando una dosis fija de ozono.

6.4.1 Estudio de la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* y de los coliformes totales y coliformes termotolerantes.

El segundo grupo de ensayos se realizaron a una ozonización de 40 g/h, con flujos de efluente de 30 L/min, 40 L/min y 50 L/min.

En la Tabla 21 se tiene una dosis constante de 22.22 mg/L de ozono, a un flujo de agua residual de 30 L/min.

La muestra inicial (tiempo cero) registró un contenido para coliformes totales de 920,000 NMP/100 mL, y para coliformes termotolerantes de 540,000 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 323 mV, oxígeno disuelto de 4.1 mg/L, y una turbidez de 10 NTU.

A los 10 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales disminuyó a 22,000 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 17,000 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 96.85%, con valores de ORP de 332 mV y oxígeno disuelto de 5.2 mg/L.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 4,900 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 4,900 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 99.09%, con valores de ORP de 344 mV y oxígeno disuelto de 6.3 mg/L.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 2,200 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 1,700 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 99.69%, con valores de ORP de 354 mV y oxígeno disuelto de 8.3 mg/L.

A los 50 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue 790 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 330 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 99.94%, con valores de ORP de 365 mV y oxígeno disuelto de 9.1 mg/L.

En la Tabla 22 se tiene una dosis constante de 16.67 mg/L de ozono, a un flujo de agua residual de 40 L/min.

La muestra inicial (tiempo cero) registró un contenido para coliformes totales de 23,000 NMP/100 mL, y para coliformes termotolerantes de 23,000 NMP/100 mL, con un valor de ORP de 380 mV, oxígeno disuelto de 2.2 mg/L y una turbidez de 13.9 NTU.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 7,000 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 3,300 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 85.65%, con valores de ORP de 388 mV, oxígeno disuelto de 8.0 mg/L, y con una turbidez de 7.0 NTU.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 3,300 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 3,300 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 85.65%, con

valores de ORP de 389 mV, oxígeno disuelto de 8.3 mg/L, y con una turbidez de 6.5 NTU.

A los 40 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 3,300 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 2,300 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 90.00%, con valores de ORP de 392 mV, oxígeno disuelto de 9.0 mg/L, y con una turbidez de 6.0 NTU.

A los 60 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 2,400 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 2,400 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 89.57%, con valores de ORP de 399 mV, oxígeno disuelto de 9.4 mg/L, y una turbidez de 5.7 NTU.

En la Tabla 23 se tiene una dosis constante de 13.33 mg/L de ozono, a un flujo de agua residual de 50 L/min.

La muestra inicial (tiempo cero) registró un contenido para coliformes totales de 49,000 NMP/100 mL, y para coliformes termotolerantes 23,000 NMP/100 mL, con valores de ORP de 345 mV, oxígeno disuelto de 2.5 mg/L, y una turbidez de 10 NTU.

A los 20 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 3,300 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 3,300 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 85.65%, con valores de ORP de 373 mV y oxígeno disuelto de 6.3 mg/L.

A los 30 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 1,300 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 1,300 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 94.35%, con valores de ORP de 382 mV y oxígeno disuelto de 6.5 mg/L.

A los 40 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue 1,700 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 1,700 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 92.61%, con valores de ORP de 388 mV y oxígeno disuelto de 6.7 mg/L.

A los 60 minutos de ozonización, el valor de los coliformes totales fue de 490 NMP/100 mL, y para el caso de los coliformes termotolerantes disminuyeron a 490 NMP/100 mL, con un porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes de 97.87%, con valores de ORP de 396 mV y oxígeno disuelto de 7.2 mg/L.

De este grupo de ensayos a dosis fija durante la ozonización, se obtienen valores máximos de ORP de 400 mV, y en los tres casos se logra obtener valores de coliformes termotolerantes menores a 10,000 NMP/100 mL.

A pesar de haber realizado estos tres ensayos en fechas distintas, y con valores iniciales de ORP y coliformes totales y termotolerantes diferentes, se alcanzan eficiencias en la desinfección de coliformes mayores al 90%.

Estos resultados se obtuvieron a un flujo máximo de 50 L/min de agua residual y con la máxima velocidad de ozonización del equipo (40g/h), y se logran valores de los coliformes termotolerantes por debajo de los 10,000 NMP/100 mL..

6.5 Discusión de los resultados de medición de SST, DQO, DBO y contenido de coliformes termotolerantes en muestras ozonizadas del agua residual.

Los resultados de la Tabla 24 muestran una carga muy elevada de contaminación del agua residual que ingresa a la PTAR:

DBO<142.3 mg/L, DQO<299.1 mg/L, SST<79mg/L y CTT de 3'300,000 NMP/100 mL.

Del ensayo de ozonización a 40 g/h durante 30 minutos y sin flujo, Tabla 25, se logra reducir significativamente el nivel de contaminación:

DBO<2.6 mg/L, DQO<28.9 mg/L, SST<7 mg/L y CTT de 1.8 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 30 minutos de ozonización y un valor de ORP de 387 mV.

Del ensayo de ozonización a dosis variable, durante 150 minutos con flujo de 45 L/min de agua residual, Tabla 26, también se aprecia valores bajos para estos parámetros:

DBO <3 mg/L, DQO <2.6 mg/L, SST <4.5 mg/L, y CTT de 1.8 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 90 minutos de ozonización y un valor de ORP de 350 mV.

Del ensayo de ozonización a dosis variable, durante 150 minutos con flujo de 50 L/min de agua residual, Tabla 27, se tiene los resultados:

DBO <17 mg/L, DQO <2.6 mg/L, SST <4.7 mg/L, y CTT de 2.0 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 100 minutos de ozonización y un valor de ORP de 403 mV.

Del ensayo de ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 30 L/min, Tabla 28, se tiene los resultados:

DBO<9.0 mg/L, DQO<2.8 mg/L, SST<15.2 mg/L y CTT de 1.8 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 30 minutos de ozonización y un valor de ORP de 354 mV.

Del ensayo de ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 40 L/min, Tabla 29, se tiene los resultados:

DBO <9.0 mg/L, DQO <2.8 mg/L, SST <15.2 mg/L y CTT de 1.8 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 30 minutos de ozonización y un valor de ORP de 389 mV.

Del ensayo de ozonización a 40 g/h a un flujo de efluente de 50 L/min., Tabla 30, se tiene los resultados:

DBO <9.0 mg/L, DQ <2.6 mg/L, SST <4.5 mg/L y CTT de 2.0 NMP/100 mL.

Estos resultados corresponden a 30 minutos de ozonización y un valor de ORP de 382 mV.

En todos los resultados se pudo corroborar que los parámetros DBO, DQO, SST y CCT se encuentran dentro de los resultados permitidos según la Tabla 2 de MINAM para límites máximos permisibles en efluentes de PTAR.

6.6 Modelo matemático propuesto para describir el comportamiento de la desinfección con ozono.

El nivel de avance en el planteamiento de este modelo permite una estimación semicuantitativa del valor de la DQO y de la eficiencia en el tratamiento del agua residual.

Las discrepancias radican principalmente en que el valor de DQO predicho por el modelo se basa en extrapolar la función de ajuste sigmoïdal para tiempos muy largos, que a su vez depende de los valores introducidos en esta función.

El modelo propuesto se basa en el balance de masas de las especies químicas involucradas, y del ajuste sigmoïdal entre sus concentraciones y mediciones de potencial eléctrico.

Sus resultados son susceptibles de una mejor aproximación hacia valores reales en la medida en que se incluyan parámetros propios de fenómenos de transporte (coeficientes de difusión) y aspectos más precisos dentro del mecanismo de reacción simplificado (auto-reacción de ozono y medición de su contenido a la salida del tanque). Estos factores propios de la auto-reacción del ozono se estiman aplicando el mismo método planteado al agua potable tratado con ozono, y realizando las correcciones propias para una mejor aproximación en los valores de DQO en el agua residual tratada.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados, en la presente investigación se estudió la evolución del potencial de óxido-reducción (ORP), oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, pH, conductividad electrolítica, temperatura, salinidad y la cantidad de ozono libre en el tanque de reacción, durante ensayos de ozonización en la PTAR de Cieneguilla, llegando a las siguientes conclusiones:

- Al estudiar la ozonización del efluente terciario en el rango de flujos entre 30 L/min a 50 L/min, con dosis de ozono entre 4 mg/L a 22 mg/L durante 20-60 minutos de aplicación, se cuantificó que la eficiencia en eliminar coliformes termotolerantes estuvo en el rango de 96-99%, dependiendo de la carga inicial de contaminantes en el agua residual, la cual se encontró a un valor máximo de 5'400,000 NMP/100 mL de coliformes termotolerantes.
- Registrando la evolución en los valores del potencial de óxido-reducción (ORP) se validó que durante la ozonización del efluente terciario y alcanzar valores de ORP superiores a 390 mV, se logró reducir el contenido de coliformes termotolerantes por debajo de 10,000 NMP/100 mL, incluso hasta en agua con altos valores de coliformes termotolerantes de 5,400,000 NMP/100 mL, con lo cual se permitiría la descarga final del agua tratada. Esta validación de la ozonización se realizó midiendo la evolución en el contenido de sólidos totales disueltos, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y el contenido de coliformes termotolerantes.
- Se logró desarrollar un modelo preliminar a partir de los trabajos experimentales realizados en PTAR-Cieneguilla, el cual describe el comportamiento de la desinfección a lo largo del tiempo con ozono en relación a las variables críticas contenido de oxígeno disuelto y la variación del potencial de óxido-reducción (ORP) al interior y exterior del tanque, para así estimar *in situ* los cambios en la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente. Los datos experimentales presentan una correlación sigmoideal entre DQO y ORP. Se puede mejorar el modelo con mediciones mediante equipos más sensible al ozono disuelto que no reacciona, con lo cual se podría estimar mejor los valores reales de DQO *in situ*. En tal caso, se podría incluir estos datos en el balance de masas del oxígeno, y estimar mejor el contenido de contaminantes oxidados, y con ello el valor de DQO.

8. RECOMENDACIONES

- Para lograr un control *in situ* de la calidad del agua residual desinfectada, los parámetros más importantes a controlar son el ORP y la concentración de oxígeno disuelto. En este estudio, el ORP interno fue monitoreado de manera automática y continua en el tiempo; en cambio, el oxígeno disuelto y ORP externo fueron medidos manual e intermitentemente con equipos portátiles. Convendría medir todos estos parámetros de manera automática y continua en el tiempo.
- Para mejorar el planteamiento del modelo matemático, se requeriría realizar ensayos midiendo la evolución de la DQO en la ozonización, lo cual permitiría mejorar la estimación semicuantitativa del valor de la DQO y de la eficiencia en el tratamiento del agua residual.
- El modelo desarrollado podría usarse en trabajos futuros de extrapolación y/o validación de resultados. Consideramos que el modelo obtenido puede ser mejorado bajo condiciones de mediciones complementarias basadas en detectores de mayor sensibilidad, especialmente en cuanto a la cuantificación del ozono disuelto a la salida del tanque, así como del ozono liberado al aire.
- Los resultados de este modelo, son susceptibles de una mejor aproximación hacia valores reales en la medida en que se incluyan parámetros propios de fenómenos de transporte (coeficientes de difusión) y aspectos más precisos dentro del mecanismo de reacción simplificado (auto-reacción de ozono y medición de su contenido a la salida del tanque).

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zhou, H. and Smith, D.W. (2002). Advanced technologies in water and wastewater Treatment. *J. Environ. Eng. Sci.*; 1: 247-264.
2. Macauley, J. J., Qiang, Z., Adams, C. D., Surampalli, R., & Mormile, M. R., (2006). Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone. *Water Research*. 40 (10): 2017-2026.
3. Agnihotri, V., Borse, K., Bhandarkar, H., Subramaniam, V. and Bhardwaj S., (2018). Efficacy of ozone to reduce total viable count, yeast and mould count, coliform count and enterobacteriaceae count in raw onion and dehydrated onion products. *Plant Archives*. Vol. 18 No. 2: 2811-2821.
4. Reichart, O., Szakmár, K., Jozwiak, A., Felföldi, J., Baranyai, L., (2007). Redox potential measurement as a rapid method for microbiological testing and its validation for coliform determination. *Journal of Food Microbiology* (114), 143–148.
5. Christensen, P., Yonar, T., Zakaria, K., (2013) The Electrochemical Generation of Ozone: A Review, *Ozone: Science & Engineering*, 35:3, 149-167.
6. Da Silva, L., Santana, M., Boodts, J., (2003). Electrochemistry and green chemical processes: Electrochemical ozone production. *Quim. Nova*, Vol. 26, No. 6, 880-888.
7. Lawrence, J., Cappelli, F., (1977) Ozone in drinking water treatment: A review. *Science of The Total Environment*, Volume 7, Issue 2, 99-108.
8. Tebbutt, T.H.Y. (1998). Principles of Water Quality Control. *Butterworth Heinemann, 5th Ed. London*.
9. Dura, G., Kambourova, V., Simeonova, F., (2006). Management of Intentional and Accidental Water Pollution. *Springer, Dordrecht*.
10. United Nations Environment Programme (2008). *Water Quality for Ecosystem and Human Health*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/12217>.
11. Zinicovscaia, I., Cepoi L., (2016). Cyanobacteria for bioremediation of wastewaters. *SpringerLink, Chicago*.
12. Larrea-Murrell, J., Rojas-Badía, M., (2012). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, Vol. 44, No. 3, 24-34
13. Presidente de la República. Decreto Supremo N 002-2008-MINAM.

14. EPA. United States Environmental Protection Agency (1997). Water Quality Criteria p. 25.
<http://pubs.usgs.gov/wri/wri014194/pdf/section-3.pdf>
15. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Services (2015). Soil Quality Indicator Sheets. Physical, chemical, and biological indicators for soil quality assessment and management.
16. Ayers, R., Westcot, D., (1994). Water quality for agriculture. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome.
17. Sierra, C., (2011). Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico. *Universidad de Medellín, Ediciones de la U*. pg. 50-79, Medellín.
18. Trapote, J., (2020) Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. *Publicaciones de la Universidad de Alicante*, 2da Edición.
19. OEFA, (2014). Fiscalización ambiental en aguas residuales. *MINAM, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental*, pg. 36.
20. Alianza por el Agua, CENTA, (2008). Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. *Ideasamare*, San Salvador.
21. Romero, J. A., (2005), Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales. *Escuela Colombiana de Ingeniería*, Bogotá.
22. Lucini, E., Merlo, C., Belén, L., (2020). Complemento teórico del curso de Microbiología Agrícola, capítulo 1: Grupos microbianos. *Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba*, Córdoba.
23. University of Cornell, College of Agriculture and Life Sciences. Blog activity research Lab of Microbiology.
<https://cals.cornell.edu/microbiology/research/active-research-labs/angert-lab/epulopiscium-en-espanol/endospora-de-bacterias>.
24. Slieman, T., Nicholson W., (2001), Role of dipicolinic acid in survival of *Bacillus subtilis* spores exposed to artificial and solar UV radiation. *American Society for Microbiology*. Mar. 2001, pg. 1274–1279
25. Suslow, T., (2004), Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation, *University of California, Division of Agriculture and Natural Resources*, Publication 8149.
26. Presidente de la República. Decreto Supremo N 003-2010-MINAM.
27. Cano, A., Barrera-Díaz, C., Roa-Morales, G., Balderas P., Romero, R., and Natividad, R. (2011). Wastewater Ozonation Catalyzed by Iron. *American Chemical Society, Ind. Eng. Chem. Res.* (50), 2488–2494
28. Hanna Instruments, blogs artículos.
<https://www.hannacolombia.com/blog/post/27/importancia-la-medida-orp>

29. Zafonte, L., Long, W., and James N. Pitts, J. (1974). Evaluation of an Ozone Photometer for Ambient Ozone Measurements, *Analytical Chemistry*, Vol. 46, No. 12.
30. Dewey University. Curso de Microbiología, Tema: Tinción de Gram (2022). <https://dewey.edu/wp-content/uploads/2015/06/Tinci%C3%B3n-de-Gram.pdf>
31. Top Ozono, Tecnología para crear ozono, blogs. <https://topozono.com/ozono/tecnologia-para-generar-ozono/>
32. Aqua Química Water Technology. Blogs. <https://aquaquimica.net/ventajas-desventajas-agua-ozono/>
33. Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H., Stahl, D.A., (2015). Brock, biología de los microorganismos. *Pearson Educación S.A.* Madrid, 14ta Ed.
34. Educa y crea: Electrólisis del agua. <https://www.educaycrea.com/2013/05/la-electrolisis-descomposicion-del-agua/>
35. Losada, L., Florencio, F., (1999). Los elementos y moléculas de la vida. *Ed. Alcorcón*, Madrid.
36. Orlob, G.T., (1983). Mathematical modeling of water quality: streams, lakes and reservoirs. *International Institute for Applied Systems Analysis, John Wiley & Sons, Pitman Press, Bath (UK)*.
37. Rauschenbach, T., (2016). Modeling, control and optimization of water systems. Systems engineering methods for control and decision making tasks. *Springer Verlag GmbH, Berlin - Heidelberg*.