



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

“Tecnologías de cavitación hidrodinámica y nanopartículas de plata para la mejora de la calidad de aguas residuales industriales, Lima, 2019”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniera Ambiental

**AUTORA:**

Br. Lorena Tafur Rivera (ORCID: 0000-0002-7933-6046)

**ASESOR:**

Dr. Elmer Gonzales Benites Alfaro (ORCID: 0000-0003-1504-2089)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

**LIMA - PERÚ**

2019

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermano, quienes me alentaron a continuar con mi crecimiento profesional y se convirtieron en mi motivación para demostrarles que, con esfuerzo y perseverancia, conseguiría lograr mis metas, muy a pesar de todas las adversidades puestas en mi camino. A mi familia, que siempre estuvo detrás de mí desde pequeña y me demostraron lo maravilloso que es tener raíces provincianas. A Dios, porque sin su presencia en mi vida no lo hubiese logrado.

## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento sincero a mis padres y mi familia entera por ayudarme en mis estudios. A la Universidad César Vallejo, la cual me abrió sus puertas sin obstáculos y otorgarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional. Al Dr. Elmer Benites Alfaro, quién con su juicio de experto, sus conocimientos científicos, objetividad y paciencia supo guiarme para poder lograr la realización de esta investigación. A todos mis docentes que me enseñaron durante los 5 años de pregrado. Un agradecimiento especial a Promec Ingenieros SAC, Samuel Saire, Hitler Román y Silvia Nieto quiénes me ayudaron y apoyaron con las dudas que tuve en la elaboración de mis ensayos; y a mis amigos que estuvieron pendientes durante todo el presente año con su apoyo moral.

**PÁGINA DEL JURADO**

## **DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD**

Yo, Lorena Tafur Rivera, estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad César Vallejo, identificada con DNI N° 46595400, código de alumna N° 6700261434 y con la tesis titulada "Tecnologías de cavitación hidrodinámica y nanopartículas de plata para la mejora de la calidad de aguas residuales industriales, Lima, 2019", a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo.

Declaro que:

El contenido de la presente tesis es de mi autoría y que toda la información presentada en la misma es auténtica y veraz; asimismo he respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas que están incluidas en dicha investigación.

Los Olivos, 17 de diciembre de 2019



Lorena Tafur Rivera

DNI: 46595400

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD .....	v
ÍNDICE .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MÉTODO .....	41
2.1 Tipo y diseño de investigación .....	41
2.2 Operacionalización de variables .....	42
2.3 Población, muestra y muestreo .....	42
2.3.1 Población: .....	42
2.3.2 Muestra: .....	42
2.4.1 Técnica.....	43
2.4.2 Instrumentos .....	44
2.4.3 Validez.....	44
2.4.4 Confiabilidad .....	45
2.5 Procedimiento.....	45
2.6 Métodos de análisis de datos .....	60
2.7 Aspectos éticos .....	60
III. RESULTADOS .....	62
IV. DISCUSIÓN .....	108
V. CONCLUSIONES .....	112
VI. RECOMENDACIONES.....	114
VII. REFERENCIAS.....	115
VIII. ANEXOS .....	131
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	131
Anexo 2. Instrumentos.....	133
Anexo 3. Validación de Instrumentos .....	137
Anexo 4. Registro fotográfico de los análisis físico-químicos y microbiológicos.....	153
Anexo 5. Resultados de análisis de caracterización inicial de la muestra .....	155
Anexo 6. Resultados de análisis de aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica .....	156
Anexo 7. Resultados de análisis de aplicación de la tecnología de nanopartículas de plata .....	164
Anexo 8. Certificado de caracterización de nanopartículas de plata .....	176
Anexo 9. Certificado de calibración de multiparámetro de mesa.....	179

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límite máximo permisible de efluentes para alcantarillado de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre .....	35
Tabla 2. Límite máximo permisible de efluentes para aguas superficiales de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre.....	36
Tabla 3. Matriz de operacionalización de Variables .....	42
Tabla 4. Distribución de muestras .....	43
Tabla 5. Resultados de los parámetros físico-químicos tomados In-Situ.....	62
Tabla 6. Caracterización inicial de agua residual industrial .....	62
Tabla 7. Comparación de resultados de la caracterización del agua residual industrial de curtiembre con los LMP .....	63
Tabla 8. Condiciones de operación de CH .....	64
Tabla 9. Tamaño de las nanopartículas de plata de acuerdo a la posición de los picos de absorción en el espectro UV-Vis .....	65
Tabla 10. Propiedades físicas de la caracterización de las nanopartículas de plata sintetizadas.....	67
Tabla 11. Condiciones de Operación del extracto de <i>Aloysia triphylla</i> .....	67
Tabla 12. Resultados de la CH – T (°C).....	68
Tabla 13. Resultados de la CH – CE (uS/cm) .....	69
Tabla 14. Resultados de la CH – SST(mg/L) .....	70
Tabla 15. Resultados de la CH – pH .....	71
Tabla 16. Resultados de la CH – DBO (mg/L).....	72
Tabla 17. Resultados de la CH – DQO (mg/L) .....	73
Tabla 18. Resultados de la CH – AyG (mg/L) .....	74
Tabla 19. Resultados de la CH – <i>Escherichia Coli</i> (NMP/100mL).....	75
Tabla 20. Resultados de las AgNP– T (°C).....	76
Tabla 21. Prueba de normalidad para temperatura con AgNP .....	77
Tabla 22. Análisis de varianza para la temperatura.....	78
Tabla 23. Prueba de contraste de Tukey para la temperatura .....	79
Tabla 24. Resultados de las AgNP– CE (uS/cm) .....	79
Tabla 25. Prueba de normalidad para conductividad eléctrica con AgNP .....	81
Tabla 26. Análisis de varianza para conductividad eléctrica.....	81
Tabla 27. Prueba de contraste de Tukey para conductividad eléctrica.....	82
Tabla 28. Resultados de las AgNP– SST (mg/L) .....	83
Tabla 29. Prueba de normalidad para sólidos suspendidos totales con AgNP .....	84
Tabla 30. Análisis de varianza para sólidos suspendidos totales .....	85
Tabla 31. Prueba de contraste de Tukey para sólidos suspendidos totales.....	86
Tabla 32. Resultados de las AgNP– pH .....	86
Tabla 33. Prueba de normalidad para pH con AgNP .....	88
Tabla 34. Análisis de varianza para el pH.....	88
Tabla 35. Prueba de contraste de Tukey para el pH .....	89
Tabla 36. Resultados de las AgNP– DBO (mg/L).....	90
Tabla 37. Prueba de normalidad para demanda bioquímica de oxígeno con AgNP .....	91
Tabla 38. Análisis de varianza para la demanda bioquímica de oxígeno.....	92
Tabla 39. Prueba de contraste de Tukey para DBO .....	93

Tabla 40. Resultados de las AgNP– DQO (mg/L) .....	93
Tabla 41. Prueba de normalidad para demanda química de oxígeno por AgNP .....	95
Tabla 42. Análisis de varianza para la demanda química de oxígeno .....	95
Tabla 43. Prueba de contraste de Tukey para DQO .....	96
Tabla 44. Resultados de las AgNP– AyG (mg/L) .....	97
Tabla 45. Prueba de normalidad para aceites y grasas con AgNP .....	98
Tabla 46. Análisis de varianza para los aceites y grasas .....	99
Tabla 47. Prueba de contraste de Tukey para AyG .....	100
Tabla 48. Resultados de las AgNP– E. Coli (NMP/100 mL).....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de presión en la cavitación hidrodinámica .....	20
Figura 2. Formación, expansión, colapso e implosión de burbujas.....	21
Figura 3. Esquema de tamaños de partículas en relación al tamaño de las burbujas ....	22
Figura 4. Síntesis de nanopartículas de las técnicas “Top-down” y “Bottom-up” .....	28
Figura 5. Formación de nanopartículas de plata.....	30
Figura 6. Síntesis verde de nanopartículas de plata con plantas.....	33
Figura 7. Síntesis de nanopartículas de plata con espatulenol.....	34
Figura 8. Ubicación del punto de desagüe de la industria de curtiembre .....	45
Figura 9. Obtención de la muestra de agua residual industrial.....	46
Figura 10. Recolección de muestras para análisis inicial .....	47
Figura 11. Análisis de parámetros iniciales de la muestra .....	47
Figura 12. Equipo de cavitación hidrodinámica .....	48
Figura 13. Placa de orificios .....	48
Figura 14. Recolección de muestras tratadas por cavitación hidrodinámica.....	49
Figura 15. Preparación de la Aloysia triphylla .....	50
Figura 16. Obtención del extracto de Aloysia triphylla.....	51
Figura 17. Síntesis de Nanopartículas de plata con Aloysia triphylla .....	51
Figura 18. Muestra para caracterización de AgNp-At.....	52
Figura 19. Elaboración de dosis de AgNP-At .....	52
Figura 20. Aplicación de dosis de AgNP-At a aguas residuales industriales.....	53
Figura 21. Recolección de muestras tratadas por nanopartículas de plata .....	53
Figura 22. Diagrama de flujo del procedimiento de investigación.....	54
Figura 23. Espectro UV-Vis para nanopartículas de plata sintetizadas.....	64
Figura 24. Valores de diámetro medio para nanopartículas de plata sintetizadas .....	65
Figura 25. Histograma con el mayor número de conteos de nanopartículas de plata sintetizadas.....	66
Figura 26. Dispersión del tamaño de las nanopartículas de plata sintetizadas .....	66
Figura 27. Resultados de la CH para Temperatura (°C).....	68
Figura 28. Resultados de la CH para Conductividad Eléctrica (uS/cm) .....	69
Figura 29. Resultados de la CH para Sólidos Suspensidos Totales (mg/L).....	70
Figura 30. Resultados de la CH para pH .....	71
Figura 31. Resultados de la CH para demanda bioquímica de oxígeno (mg/L).....	72
Figura 32. Resultados de la CH para demanda química de oxígeno (mg/L).....	73

Figura 33. Resultados de la CH para aceites y grasas (mg/L) .....	74
Figura 34. Resultados de la CH para Escherichia coli (NMP/100mL) .....	75
Figura 35. Resultados de las AgNP para temperatura (°C) .....	76
Figura 36. Resultados de las AgNP para conductividad eléctrica (uS/cm) .....	80
Figura 37. Resultados de las AgNP para sólidos suspendidos totales (mg/L) .....	83
Figura 38. Resultados de las AgNP para pH .....	87
Figura 39. Resultados de las AgNP para demanda bioquímica de oxígeno (mg/L).....	90
Figura 40. Resultados de las AgNP para demanda química de oxígeno (mg/L).....	94
Figura 41. Resultados de las AgNP para aceites y grasas (mg/L) .....	97
Figura 42. Eficiencia en la conductividad eléctrica.....	102
Figura 43. Eficiencia en los sólidos suspendidos totales.....	102
Figura 44. Eficiencia en el pH .....	103
Figura 45. Eficiencia en la demanda bioquímica de oxígeno.....	104
Figura 46. Eficiencia en la demanda química de oxígeno .....	105
Figura 47. Eficiencia en los aceites y grasas .....	105
Figura 48. Eficiencia en la Escherichia Coli .....	106

## RESUMEN

En las últimas décadas, los avances de la tecnología han contribuido con el desarrollo del tratamiento de las aguas residuales industriales. La cavitación hidrodinámica es una tecnología que se viene estudiando a profundidad y consiste en un proceso físico por el cual se forman cavidades o burbujas por diferencia de presiones en los fluidos con la finalidad de degradar contaminantes; y las nanopartículas de plata son partículas microscópicas con características oxidantes que tienen tamaños óptimos entre 1 a 100 nm. y con tendencia a un enfoque en la química verde. La presente investigación se realizó en Lima con el objetivo de evaluar si las tecnologías de cavitación hidrodinámica y nanopartículas de plata serán eficientes para la mejora de la calidad de aguas residuales industriales, presentando una metodología que consiste en la aplicación independiente de la cavitación hidrodinámica con tres repeticiones, y la de nanopartículas de plata con tres dosis diferentes de aplicación las cuales fueron de 1 mL, 10mL y 20 mL y tres repeticiones cada una. Los resultados obtenidos evidenciaron que existe una mejora con la aplicación de la tecnología de cavitación hidrodinámica y la tecnología de nanopartículas de plata de forma independiente, puesto que los valores iniciales de la caracterización de la muestra de agua residual se redujeron luego de aplicadas las técnicas. Asimismo, se confirmó que la tecnología de nanopartículas de plata fue más eficiente para mejorar la calidad de aguas residuales industriales que la tecnología de cavitación hidrodinámica debido a que, se obtuvieron mayores porcentajes luego del cálculo de la eficiencia para los parámetros físico-químicos y microbiológicos planteados en la presente investigación.

**Palabras claves:** Cavitación hidrodinámica, Nanopartículas de plata, Agua residuales industriales, Mejora

## ABSTRACT

In recent decades, advances in technology have contributed to the development of industrial wastewater treatment. Hydrodynamic cavitation is a technology that has been studied in depth and consists of a physical process by which cavities or bubbles are formed due to differences in fluid pressures in order to degrade contaminants; and silver nanoparticles are microscopic particles with oxidizing characteristics that have optimal sizes between 1 to 100 nm and a tendency to focus on green chemistry. The present investigation was carried out in Lima with the purpose of evaluating whether hydrodynamic cavitation technologies and silver nanoparticles will be efficient for the improvement of the quality of industrial wastewater, the work presented a methodology that consists of the independent application of hydrodynamic cavitation with three repetitions, and that of silver nanoparticles with three different doses of application which were 1 mL, 10 mL and 20 mL and three repetitions each. The results obtained showed that there is an improvement with the application of hydrodynamic cavitation technology and silver nanoparticle technology independently, since the initial values of the characterization of the residual water sample were reduced after the techniques were applied. Similarly, it was confirmed that silver nanoparticle technology was more efficient in improving the quality of industrial wastewater than hydrodynamic cavitation technology because, higher percentages were obtained after the calculation of efficiency for physical-chemical and microbiological parameters raised in the present investigation.

**Keywords:** hydrodynamic cavitation, silver nanoparticles, industrial wastewater, improvement