



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio y DQO de  
aguas residuales municipales usando celdas de combustible  
microbianas**

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

Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Agüero Quiñones, Rickelmi Alessandro ([orcid.org/0000-0002-1540-7749](https://orcid.org/0000-0002-1540-7749))

Avila Sanchez, Zairi Marilu ([orcid.org/0000-0001-7635-8189](https://orcid.org/0000-0001-7635-8189))

**ASESOR:**

Dr. Cruz Monzon, Jose Alfredo ([orcid: 0000-0001-9146-7615](https://orcid.org/0000-0001-9146-7615))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2023

## DEDICATORIA

A mis queridos padres, Gilmer y Perpetuo, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y ejemplo de sacrificio y determinación. Por su amor incondicional que es el motor que me impulsa a perseguir mis sueños.

A mi hermana Mailyn, quien desde el cielo me protege, y a quien admiro por su incansable perseverancia, arduo trabajo y dedicación.

A mis demás hermanos: Giannina, Karina, Analí y Jhexer, por su apoyo y consejos que han sido de gran ayuda en mi vida.

***Rickelmi Alessandro Agüero Quiñones***

A mis amados padres, Ramiro y Claudina, por su dedicación, sacrificio y valores éticos que han sido fundamentales en mi formación. Cada logro que he alcanzado es un testimonio del amor y la guía que me han brindado a lo largo de los años. Gracias por ser mis pilares inquebrantables.

A mis queridos hermanos Yuri, Yolvin y Sebastián, por su presencia en mi vida que ha sido un regalo invaluable.

***Zairi Marilú Ávila Sánchez***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios quien nos ha dado la fuerza y perseverancia en nuestro camino, por su presencia constante, por bendecirnos con buena salud y por brindarnos la oportunidad de crecer y desarrollarnos profesionalmente.

A nuestros padres por su incansable esfuerzo, dedicación y amor incondicional hacia nosotros. Su sacrificio y compromiso han sido una inspiración constante para seguir adelante, motivándonos a esforzarnos cada día en nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro asesor, el Dr. José Alfredo Cruz Monzón, por su orientación y apoyo a lo largo de todo el proceso de investigación.

Al Dr. Luis Alberto Cabanillas Chirinos, al Msc. Segundo Jonathan Rojas Flores y a la Dra. Magaly De la Cruz Noriega, por su sabiduría, experiencia, apoyo y dedicación que han sido fundamentales para enriquecer este trabajo.

A nuestros amigos, por todas las experiencias y por siempre darnos una mano cuando lo necesitamos.

# DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

## **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, CRUZ MONZON JOSE ALFREDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Biomasa de Chlorella sp. en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbianas", cuyos autores son AVILA SANCHEZ ZAIRI MARILU, AGÜERO QUIÑONES RICKELMI ALESSANDER, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 15.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 26 de Junio del 2023

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
CRUZ MONZON JOSE ALFREDO DNI: 18887838 ORCID: 0000-0001-9146-7615	Firmado electrónicamente por: JACRUZM el 04-07- 2023 22:47:23

Código documento Trilce: TRI - 0552553



# DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE LOS AUTORES



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

## **Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, AVILA SANCHEZ ZAIRI MARILU, AGÜERO QUIÑONES RICKELMI ALESSANDER estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Biomasa de Chlorella sp. en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbianas", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
RICKELMI ALESSANDER AGÜERO QUIÑONES DNI: 72106431 ORCID: 0000-0002-1540-7749	Firmado electrónicamente por: RAGUEROQU6 el 26-06-2023 20:06:42
ZAIRI MARILU AVILA SANCHEZ DNI: 76727677 ORCID: 0000-0001-7635-8189	Firmado electrónicamente por: ZAVILASA10 el 26-06-2023 18:27:30

Código documento Trilce: TRI - 0552554



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR.....	iv
DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE LOS AUTORES.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA.....	10
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	10
3.2. Variables y operacionalización.....	10
3.3. Población, muestra y muestreo.....	10
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	11
3.5. Procedimiento .....	11
3.6. Método de análisis de datos .....	22
3.7. Aspectos éticos.....	22
IV. RESULTADOS .....	23
4.1. Efecto de la dosis de <i>Chlorella sp.</i> en la remoción de cadmio en aguas residuales municipales en CCM .....	23
4.2. Efecto del pH del agua residual municipal en la remoción de cadmio usando la biomasa de <i>Chlorella sp.</i> en CCM .....	25

4.3. Efecto del tiempo en la eliminación de Cd y DQO a las condiciones óptimas de pH del agua residual y dosis de <i>Chlorella sp.</i> en CCM.....	27
4.4. Producción de energía eléctrica en CCM durante los tratamientos experimentales .....	30
4.5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual municipal durante los tratamientos experimentales .....	32
4.6. Identificación bioquímica de los microorganismos del ánodo de las CCM de la segunda etapa operativa.....	35
4.7. Análisis SEM, EDS y FTIR de los electrodos de carbón activado de las CCM de la segunda etapa operativa.....	36
<b>V. DISCUSIÓN</b> .....	38
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	48
<b>VII. RECOMENDACIONES</b> .....	49
<b>REFERENCIAS</b> .....	50
<b>ANEXOS</b> .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Caracterización de aguas residuales municipales. ....	13
<b>Tabla 2.</b> Características fisicoquímicas iniciales de <i>Chlorella sp.</i> por cada etapa operativa.....	14
<b>Tabla 3.</b> Evaluación de la resistencia de los electrodos de carbón activado en el agua. ....	15
<b>Tabla 4.</b> Características de la primera etapa operativa.....	17
<b>Tabla 5.</b> Características de la segunda etapa operativa. ....	19
<b>Tabla 6.</b> Análisis de varianza (SC tipo III) para la eliminación de cadmio por diferente dosis aplicada de <i>Chlorella sp.</i> ....	24
<b>Tabla 7.</b> Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS=11.68769) para la remoción de cadmio por diferente dosis de <i>Chlorella sp.</i> aplicada. ....	24
<b>Tabla 8.</b> Análisis de varianza (SC tipo III) para la remoción de cadmio a diferente pH del agua residual municipal.....	26
<b>Tabla 9.</b> Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS=34.53829) para la remoción de cadmio a diferente pH del agua residual municipal. ....	26
<b>Tabla 10.</b> Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la remoción de cadmio a través del tiempo. ....	28
<b>Tabla 11.</b> Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS= 0.49915) para la remoción de cadmio a través del tiempo.....	28
<b>Tabla 12.</b> Remoción de los parámetros fisicoquímicos del agua residual municipal por cada celda en la segunda etapa.....	33
<b>Tabla 13.</b> Microorganismos identificados en el ánodo de las CCM al finalizar la segunda etapa operativa. ....	35
<b>Tabla 14.</b> Matriz de operacionalización de variables. ....	64
<b>Tabla 15.</b> Ficha de muestreo de aguas residuales municipales.....	65
<b>Tabla 16.</b> Ficha de características iniciales del agua residual municipal. ....	65
<b>Tabla 17.</b> Ficha de medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de <i>Chlorella sp.</i> .....	66
<b>Tabla 18.</b> Ficha de remoción de cadmio del agua residual para la primera etapa operativa.....	66
<b>Tabla 19.</b> Ficha de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa. ....	67

<b>Tabla 20.</b> Ficha de monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.....	68
<b>Tabla 21.</b> Ficha de monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.....	70
<b>Tabla 22.</b> Ficha de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa. ....	70
<b>Tabla 23.</b> Ficha de monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa. ....	71
<b>Tabla 24.</b> Ficha de aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del lugar del muestreo de aguas residuales municipales .....	12
Figura 2. Configuración experimental de las CCM. (A) primera etapa, (B) segunda etapa .....	16
Figura 3. Configuración operacional de las CCM en la primera etapa operativa..	18
Figura 4. Configuración operacional de las CCM en la segunda etapa operativa.	19
Figura 5. Remoción de cadmio del agua residual municipal por diferente dosis de <i>Chlorella sp.</i> aplicada en cada CCM. ....	23
Figura 6. Remoción de cadmio del agua residual municipal a diferente pH evaluado del agua residual en cada CCM. ....	25
Figura 7. Remoción de Cd a través del tiempo por cada CCM inoculada con <i>Chlorella sp.</i> al 30% en agua residual municipal con pH inicial de 7.5. .	27
Figura 8. Monitoreo de la concentración de la DQO a través del tiempo por cada CCM inoculada con <i>Chlorella sp.</i> al 30% en agua residual municipal con pH inicial de 7.5. ....	29
Figura 9. Monitoreo del voltaje generado por las CCM durante la primera etapa operativa.....	30
Figura 10. Monitoreo de la corriente eléctrica generada por las CCM durante la primera etapa operativa.....	31
Figura 11. Monitoreo del voltaje generado por las CCM durante la segunda etapa operativa.....	31
Figura 12. Monitoreo de la corriente eléctrica generada por las CCM durante la segunda etapa operativa. ....	32
Figura 13. Monitoreo del pH del agua residual municipal por cada CCM durante la primera etapa operativa.....	32
Figura 14. Variación de turbidez del agua residual municipal por cada CCM en la primera etapa operativa.....	33
Figura 15. Monitoreo del pH del agua residual municipal por cada CCM durante la segunda etapa operativa. ....	34
Figura 16. Variación de turbidez del agua residual municipal por cada CCM en la segunda etapa operativa. ....	34
Figura 17. Microorganismos aislados del ánodo de las CCM .....	35
Figura 18. Análisis SEM de los electrodos de carbón activado A) CCMA, y B) CCMB correspondiente a la segunda etapa operativa.....	36

Figura 19. A) Micrografía y B) Análisis EDS del electrodo de carbón activado de la CCMA correspondiente a la segunda etapa operativa. ....	36
Figura 20. A) Micrografía y B) Análisis EDS del electrodo de carbón activado de la CCMB correspondiente a la segunda etapa operativa. ....	37
Figura 21. Espectros de absorbancia de <i>Chlorella sp.</i> en CCMA y CCMB por FTIR durante la segunda etapa operativa. ....	37
Figura 22. Muestreo del agua residual municipal de la laguna de estabilización del distrito de Urpay, Provincia de Pataz, Departamento de La Libertad. ...	72
Figura 23. Construcción de las CCM.....	72
Figura 24. Fabricación de los electrodos de carbón activado. ....	72
Figura 25. Impermeabilización de los electrodos de carbón activado. ....	73
Figura 26. Preparación del medio de cultivo e inóculo de <i>Chlorella sp.</i> ....	73
Figura 27. Iluminación y aireación para el crecimiento de <i>Chlorella sp.</i> .....	73
Figura 28. Medición de pH de la biomasa de <i>Chlorella sp.</i> ....	74
Figura 29. Caracterización del agua residual municipal. ....	74
Figura 30. Ajuste del pH del agua residual municipal.....	74
Figura 31. Incorporación del agua residual municipal a las CCM.....	75
Figura 32. Inoculación de las CCM con <i>Chlorella sp.</i> en la primera etapa. ....	75
Figura 33. Acondicionamiento de las CCM con bombas de aireación e iluminación artificial durante la primera etapa. ....	75
Figura 34. Monitoreo de voltaje y corriente de las CCM en la primera etapa operativa.....	76
Figura 35. Monitoreo del pH del agua residual en la primera etapa operativa. ....	76
Figura 36. Monitoreo de la turbidez del agua residual en la primera etapa.....	76
Figura 37. Toma de muestra de biomasa para conteo celular y medición de absorbancia.....	77
Figura 38. Conteo celular de <i>Chlorella sp.</i> en microscopio binocular.....	77
Figura 39. Medición de absorbancia de <i>Chlorella sp.</i> en espectrofotómetro.....	77
Figura 40. Toma de muestras de las CCM para analizar la concentración final de cadmio.....	78
Figura 41. Conservación de muestras para el envío al laboratorio. ....	78
Figura 42. Incorporación del agua residual e inoculación de <i>Chlorella sp.</i> en las CCM para la segunda etapa operativa. ....	78

<i>Figura 43.</i> Acondicionamiento de bombas de aireación e iluminación artificial a las CCM en la segunda etapa operativa. ....	79
<i>Figura 44.</i> Monitoreo de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos del agua residual en la segunda etapa operativa.....	79
<i>Figura 45.</i> Monitoreo de la turbidez del agua residual en la segunda etapa. ....	79
<i>Figura 46.</i> Monitoreo de voltaje y corriente de las CCM en la segunda etapa ....	80
<i>Figura 47.</i> Toma de muestra del agua residual de las CCM cada 3 días para los análisis de cadmio y DQO. ....	80
<i>Figura 48.</i> Preservación de las muestras de agua residual a - 22 °C.....	80
<i>Figura 49.</i> Toma muestras por método de hisopado de los microorganismos del ánodo de las CCM de la segunda etapa operativa.....	81
<i>Figura 50.</i> Sembrado de las muestras en medios de cultivo Agar MacConkey y Agar Sabouraud con 4% de glucosa.....	81
<i>Figura 51.</i> Observación microscópica de las colonias de los microorganismos...	81
<i>Figura 52.</i> Suspensión de las cepas CCMA-1 y CCMB-1 en tubos de ensayo con solución salina estéril. ....	82
<i>Figura 53.</i> Medición de la densidad óptica de las cepas en suspensión con el Densichek Plus VITEK-2. ....	82
<i>Figura 54.</i> Tinción gram de los microorganismos identificados y observación microscópica.....	82
<i>Figura 55.</i> Informe de ensayo de laboratorio: resultados de los análisis iniciales de cadmio y DQO del agua residual municipal.....	83
<i>Figura 56.</i> Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de cadmio de la primera etapa operativa.....	84
<i>Figura 57.</i> Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de cadmio de la segunda etapa operativa. ....	85
<i>Figura 58.</i> Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de la DQO de la segunda etapa operativa. ....	86
<i>Figura 59.</i> Informe de identificación bioquímica de <i>Pseudomonas putida</i> .....	87
<i>Figura 60.</i> Informe de identificación bioquímica de <i>Klebsiella oxytoca</i> .....	88
<i>Figura 61.</i> Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el primer especialista.....	89
<i>Figura 62.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el primer especialista.....	90

<i>Figura 63.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el primer especialista.....	91
<i>Figura 64.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el primer especialista.....	92
<i>Figura 65.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el primer especialista.....	93
<i>Figura 66.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el primer especialista.....	94
<i>Figura 67.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el primer especialista.....	95
<i>Figura 68.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el primer especialista.....	96
<i>Figura 69.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el primer especialista.....	97
<i>Figura 70.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el primer especialista.....	98
<i>Figura 71.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el primer especialista.....	99
<i>Figura 72.</i> Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el segundo especialista. ....	100
<i>Figura 73.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el segundo especialista. ....	101
<i>Figura 74.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el segundo especialista. ....	102
<i>Figura 75.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el segundo especialista. ....	103
<i>Figura 76.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el segundo especialista. ....	104
<i>Figura 77.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el segundo especialista. ....	105
<i>Figura 78.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el segundo especialista. ....	106
<i>Figura 79.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el segundo especialista. ....	107

<i>Figura 80.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el segundo especialista. ....	108
<i>Figura 81.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el segundo especialista. ....	109
<i>Figura 82.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el segundo especialista. ....	110
<i>Figura 83.</i> Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el tercer especialista.....	111
<i>Figura 84.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el tercer especialista.....	112
<i>Figura 85.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el tercer especialista.....	113
<i>Figura 86.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el tercer especialista.....	114
<i>Figura 87.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el tercer especialista.....	115
<i>Figura 88.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el tercer especialista.....	116
<i>Figura 89.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el tercer especialista.....	117
<i>Figura 90.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el tercer especialista.....	118
<i>Figura 91.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el tercer especialista.....	119
<i>Figura 92.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el tercer especialista.....	120
<i>Figura 93.</i> Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el tercer especialista.....	121
<i>Figura 94.</i> Resultado de similitud del programa Turnitin. ....	122

## RESUMEN

La creciente generación de aguas residuales con altos niveles de contaminantes se ha convertido en un grave desafío ambiental, en este contexto, se requieren de tecnologías sostenibles para tratar eficientemente las aguas residuales. Por ello, se propuso evaluar el efecto de la biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio y DQO de las aguas residuales municipales del distrito de Urpay, Pataz, La Libertad y en la generación de electricidad usando celdas de combustible microbianas (CCM). Se aplicó un diseño experimental, en donde se realizaron 9 tratamientos considerando 3 dosis de *Chlorella sp.* (10%, 20% y 30%), a valores de pH 6.5, 7.0 y 7.5 del agua residual, y con dos réplicas por tratamiento. Los resultados muestran que las mejores condiciones para la remoción del Cd fueron con dosis del 30% y a pH de 7.5, logrando eliminar el 97.5% en 25 días; así mismo, a dichas condiciones se eliminó la DQO en un 61.4% en 15 días, y se generaron valores máximos de voltaje (1118.5 mV) y corriente (4.61 mA). Se concluye que el pH y la dosis de *Chlorella sp.* tienen un efecto positivo en la remoción de Cd y DQO en aguas residuales utilizando CCM.

**Palabras Clave:** *Chlorella sp.*, celdas de combustible microbianas, agua residual municipal, remoción de cadmio, remoción de DQO.

## ABSTRACT

The increasing generation of wastewater with high levels of pollutants has become a serious environmental challenge, in this context, sustainable technologies are required to efficiently treat wastewater. Therefore, it was proposed to evaluate the effect of the biomass of *Chlorella sp.* in the removal of cadmium and COD from municipal wastewater in the district of Urpay, Patataz, La Libertad and in the generation of electricity using microbial fuel cells (MFC). An experimental design was applied, where 9 treatments were carried out considering 3 doses of *Chlorella sp.* (10%, 20% and 30%), at pH values 6.5, 7.0 and 7.5 of the residual water, and with two replicates per treatment. The results show that the best conditions for the removal of Cd were with a dose of 30% and a pH of 7.5, managing to eliminate 97.5% in 25 days; Likewise, under these conditions, COD was eliminated by 61.4% in 15 days, and maximum values of voltage (1118.5 mV) and current (4.61 mA) were generated. It is concluded that the pH and the dose of *Chlorella sp.* have a positive effect on the removal of Cd and COD in wastewater using CCM.

**Keywords:** *Chlorella sp.*, microbial fuel cells, municipal wastewater, cadmium removal, COD removal.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la generación de aguas residuales con elevados niveles de contaminantes se ha incrementado debido al desarrollo industrial y al crecimiento de la población, lo que se ha vuelto un grave desafío ambiental y de salud para la sociedad (Khandaker et al., 2021; Bird et al., 2022).

De la enorme cantidad de aguas residuales que se producen a diario por diversas fuentes, el 80% se descarga al medio natural sin cumplir con los estándares óptimos de calidad de agua (Rangabhashiyam et al., 2022; Chin et al., 2022), lo que provoca graves impactos en la ecología acuática y del medio ambiente, y también en la salud pública (Fadzli et al., 2021; Singh & Kaushik, 2021), debido a las sustancias tóxicas que se encuentran en ella, tales como metales pesados, compuestos orgánicos, hidrocarburos aromáticos, antibióticos y compuestos fenólicos (Sharma et al., 2022).

Con todo y lo anterior, es necesario el tratamiento adecuado de las aguas residuales, sin embargo, las técnicas convencionales de tratamiento presentan limitaciones por su elevado costo operativo (Chin et al., 2022), la generación de grandes cantidades de residuos y su falta de eficacia, lo que resulta en la emisión de gases de efecto invernadero y sustancias nocivas (Nawaz et al., 2022). Como si fuera poco, su operación está orientada al consumo de la electricidad (Antolini, 2019), pues el 3% de la electricidad, se emplea en los procesos de depuración de aguas residuales (Mohamed et al., 2021; Ye et al., 2019), lo que genera otra preocupación, que es la utilización excesiva de combustibles fósiles para la producción de energía (Arun et al., 2020), que debido a su disponibilidad limitada y sus efectos ambientales adversos conllevan a buscar otras fuentes sostenibles (Verma et al., 2021).

En este contexto, para abordar ambos problemas, se requieren tecnologías sostenibles, de bajo costo y eficientes (Gul et al., 2021; Yu et al., 2021). Al respecto conviene decir que las celdas de combustible microbianas (CCM) están siendo reconocidas como una tecnología sostenible y alentadora a futuro para la producción de energía mientras se tratan eficientemente las aguas residuales (Do et al., 2018). Estas celdas combinan reacciones electroquímicas con el metabolismo microbiano (Khandaker et al., 2021)

para generar electricidad por medio de la oxidación de las sustancias orgánicas biodegradables (Mohyudin et al., 2022; Cheraghipoor et al., 2022). Aun así, hasta la fecha no se ha alcanzado un rendimiento ideal por los parámetros que influyen en su funcionamiento como el pH, el material de los electrodos, la dosis del sustrato, el periodo de evaluación, la configuración de la celda, entre otros (Gadkari et al., 2020).

Por lo expuesto anteriormente, el problema de investigación fue: ¿Cuál será el efecto de la biomasa de la microalga *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio (Cd) y demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales municipales, así como en la generación de electricidad usando CCM?

La investigación se fundamentó en una base teórica al abordar un vacío de conocimiento en relación a la aplicación de las CCM para la eliminación de metales pesados en aguas residuales (Nookwam et al., 2022). Además, permitió la optimización de los parámetros operativos de las celdas, lo cual resultará beneficioso para futuras investigaciones en este campo (Kouam & Mandal, 2022). Por otro lado, la justificación práctica y social se evidenció al contribuir en la solución de un problema ambiental como lo es el tratamiento de aguas residuales municipales (Arun et al., 2020).

Por consiguiente, el objetivo general de la investigación fue evaluar el efecto de la biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de Cd y DQO en aguas residuales municipales, y en la generación de energía eléctrica usando CCM, mientras que los objetivos específicos fueron: evaluar el efecto de la dosis de *Chlorella sp.* en la remoción de Cd en aguas residuales municipales usando CCM; evaluar el efecto que produce el pH del agua residual municipal en la remoción de Cd usando la biomasa de *Chlorella sp.* en CCM; evaluar el efecto del tiempo en el proceso de degradación de Cd a las condiciones óptimas de pH del agua residual y dosis de *Chlorella sp.* en CCM, así como su influencia en la eliminación de la DQO; y por último, evaluar la producción de energía eléctrica en CCM durante los tratamientos experimentales. Teniendo como hipótesis que la biomasa de *Chlorella sp.* tendrá un efecto significativo en la remoción de Cd y DQO de agua residuales municipales usando CCM.

## II. MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales se caracterizan por ser aquellas aguas con una combinación de diferentes contaminantes orgánicos e inorgánicos que se generan como resultado de diversas actividades industriales y domésticas (Fonseca & Panimbosa, 2021, p.7). El tratamiento de estas aguas representa un importante desafío para los países en desarrollo, pero al mismo tiempo es una necesidad imperante para preservar el medio ambiente y proteger los cuerpos de agua que sirven como fuentes de suministro de agua potable (Khandaker et al., 2021).

En la actualidad, se ha observado un incremento en la descarga de aguas residuales sin un tratamiento adecuado provenientes de fuentes municipales, industriales y agrícolas (Muñoz-Cupa et al., 2020). Esta práctica trae impactos negativos en la ecología acuática, la calidad del agua potable y la salud de la población (Singh & Kaushik, 2021), debido a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos (Fadzli et al., 2021).

Entre los elementos contaminantes que se encuentran en las aguas residuales se incluyen compuestos orgánicos, metales pesados, hidrocarburos aromáticos, compuestos fenólicos y antibióticos (Sharma et al., 2022), siendo los dos primeros los más prevalentes. En el caso de los compuestos orgánicos, se destaca la demanda química de oxígeno (DQO), que representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la totalidad de la materia orgánica oxidable presente (De Castro et al., 2023, p.3). En cuanto a los metales pesados, el cadmio (Cd) es uno de los que se encuentra con mayor frecuencia en las aguas residuales (Singh & Kaushik, 2021).

El cadmio es muy peligroso para el medio ambiente, tóxico hasta en mínimas cantidades, se puede acumular en el cuerpo humano y provocar insuficiencia renal, fragilidad ósea y fracturas. Las fuentes principales de acumulación de este metal en las aguas residuales provienen de la producción de baterías, de los relaves mineros, de la galvanoplastia y otras descargas industriales (Quijano et al., 2021, p. 2-3).

Respecto a las técnicas convencionales de tratamiento de aguas residuales, estas presentan grandes limitaciones por sus elevados costos operativos, su alto consumo energético, su ineficiencia y sus efectos secundarios adversos (Ye et al., 2019). Actualmente, se han venido aplicando una variedad de técnicas que incluyen métodos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de aguas residuales, aun así, ninguna técnica ha sido eficiente en términos económicos y ambientales (Nawaz et al., 2022).

Los métodos físicos como la filtración mecánica y separación de espuma no son efectivos para la eliminación de contaminantes orgánicos solubles (Wang et al., 2022). En cambio, los métodos químicos como la oxidación química tienen la ventaja de remover los contaminantes orgánicos con una elevada eficiencia, pero requieren de equipos costosos, además de que pueden causar efectos ambientales negativos (Mohyudin et al., 2022).

Por su parte, los métodos biológicos son capaces de eliminar de manera efectiva los contaminantes orgánicos mediante la absorción y degradación de la materia orgánica a través de microorganismos (Haris et al., 2022). Por ejemplo, los métodos anaeróbicos, como la digestión anaeróbica, se utilizan ampliamente porque ahorra energía y porque convierte compuestos orgánicos en biogás, pero se requieren de más pasos para separar y limpiar dicha energía (Do et al., 2018). En cuanto a los métodos aeróbicos, como los lodos activados, presentan una alta eficiencia en un corto periodo de tiempo, aunque la aireación relacionada con el crecimiento microbiano requiere de grandes cantidades de energía (Khandaker et al., 2021).

En este contexto, surge la necesidad de investigar y desarrollar nuevas tecnologías y métodos más económicos, energéticamente eficientes y sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales, y cumplir con las regulaciones ambientales (Rangabhashiyam et al., 2022; Gul et al., 2021).

En la actualidad, las celdas de combustible microbianas (CCM) están siendo reconocidas como una tecnología emergente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y la generación simultánea de electricidad. Se ha observado que las CCM podrían tener eficiencias superiores a los métodos

convencionales de tratamiento de aguas residuales (Christwardana et al., 2020). Esto se debe a que, a diferencia de los métodos tradicionales, las CCM ofrecen varias ventajas en términos energéticos (producción de electricidad y ahorro de energía al eliminar la necesidad de aireación), ambientales (tratamiento de aguas residuales), económicas (generación de ingresos a través de la energía y productos de valor agregado, bajos costos operativos y eliminación de procesos posteriores) y operativas (autogeneración de microorganismos, alta resistencia al estrés ambiental y monitoreo en tiempo real) (Arun et al., 2020; Gude, 2016).

Estas celdas son sistemas bioelectroquímicos que puede convertir la energía química del sustrato en energía eléctrica por medio del metabolismo microbiano que sirven como biocatalizadores de las reacciones para oxidar la materia orgánica (Bolognesi et al., 2022; Gupta et al., 2021). Constan generalmente de tres partes principales, el compartimiento o cámara del ánodo (anaeróbica que incluye un electrodo y microorganismo), en el cual se realiza la oxidación del sustrato, el compartimiento de cátodo (aeróbica o anaeróbica que incluye el catalizador) en el que se da lugar a la reducción del oxidante y la membrana de intercambio protónico (MIP) que funciona como separador de los compartimientos (Silveira et al., 2020).

Los microorganismos presentes en la cámara del ánodo funcionan como biocatalizadores y oxidan los compuestos orgánicos del agua residual (eliminando los contaminantes), para producir electrones y protones (Saran et al., 2023). Los electrones se transportan al cátodo por medio de un circuito externo desde el ánodo (Shirkosh et al., 2022), mientras que los protones llegan a la cámara catódica a través de la MIP (Zhou et al., 2018). Los electrones y protones interactúan con los aceptores de electrones en el cátodo para producir electricidad (Bolognesi et al., 2022). Asimismo, las CCM permiten mejorar el crecimiento de microorganismos exoelectrogénicos durante los procesos de tratamiento de aguas residuales, lo que se traduce a una buena estabilidad operativa (Do et al., 2018), y da como resultado una elevada eliminación de los contaminantes del agua residual, como la DQO que se puede eliminar hasta el 90% (Ramya & Kumar, 2022).

Las CCM generalmente se construyen de dos formas: de una cámara y de doble cámara. Las celdas de una cámara no tienen una MIP, por lo que el ánodo y el cátodo se encuentran en un solo compartimiento, en este tipo de celda, el cátodo está expuesto al aire, por lo cual no se requiere aireación y origina que el oxígeno reaccione con los electrones y protones producidos durante la reacción microbiana (Obileke et al., 2021), mientras que las celdas de doble cámara si tienen una MIP, y las cámaras del ánodo y cátodo se encuentran separadas, este tipo de celdas cuentan con un circuito externo para el flujo de electrones (Mohyudin et al., 2022, p.20).

Diversos factores pueden influir en el rendimiento de las celdas de combustible microbianas tanto en la producción de energía como en la eliminación de contaminantes del agua residual. Estos factores incluyen el material de los electrodos, el diseño de la celda, la temperatura, el pH, la dosis del sustrato, el material de la membrana, entre otros (Nawaz et al., 2022; Kouam & Mandal, 2022).

En el caso del material de los electrodos, es importante considerar aquellos que tengan una interacción con los microorganismos, es recomendable los electrodos a base de carbono (Sharafat et al., 2022). Estos materiales a base de carbono han atraído más la atención de los investigadores debido a su cualidades únicas como son la estabilidad química, térmica y electroquímica, mejorando notablemente la producción de electricidad y remoción de contaminantes del agua residual en MFC (Sharif et al., 2021). Entre estos materiales se encuentra el carbón activado granular (GAC) (Gajda et al., 2020; Cheraghipoor et al., 2022; Slate et al., 2019). Este último no ha tenido muchas aplicaciones como material para fabricar electrodos anódicos de las MFC, pero cuenta con muchas propiedades que lo convierten en un buen candidato (Poli, Santoro & Soavi, 2023; Do et al., 2018, p.10).

Para la el caso de la temperatura de funcionamiento, esta tiene mucha influencia en varias variables como la conductividad eléctrica del agua residual, donde el efecto puede alterar la densidad de potencia, es recomendable trabajar en una temperatura entre 20-25°C (Gadkari et al., 2020, p.8). Además, el pH es recomendable de 6-8 (Kouam & Mandal, 2022).

Es importante mencionar que las CCM asistidas por microalgas han despertado aún más la atención de los investigadores por sus elevadas eficiencias para el tratamiento de aguas residuales y generación de electricidad (Sharma et al 2022, p.3). Esto se debe a que las microalgas pueden actuar como catalizadores en las CCM para la eliminación de contaminantes, como metales pesados, materia orgánica y algunos nutrientes (Arun et al., 2020). Específicamente, en estos tratamientos, la biomasa de microalgas aumenta fijando CO<sub>2</sub> y asimilando los nutrientes (N y P) presentes en las aguas residuales (Zhou et al., 2022), mientras que la actividad fotosintética realizada por estos microorganismos permite generar oxígeno que es aprovechado por las bacterias aeróbicas heterótrofas para degradar la materia orgánica del agua residual (García-Galán et al., 2021).

Las microalgas son organismos fotosintéticos que requieren de luz, dióxido de carbono y nutrientes para su crecimiento (Haris et al., 2022), se encuentran en la mayoría de ecosistemas acuáticos y pueden vivir y adaptarse en diversas condiciones ambientales dependiendo de cada especie (Gomes et al., 2022). Aparte de ello, se caracterizan por producir una biomasa considerable en un corto periodo de tiempo (Bo et al., 2023), la cual permite producir bioenergía con los dispositivos o sistemas adecuados (Vale et al., 2022). Además, su gran diversidad de especies lo convierte en un buen candidato para ser potencialmente utilizado en varios sectores (Rueda et al., 2020; Raheem et al., 2018, p.43).

En los últimos años, ha habido un creciente interés en la investigación sobre el uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales (Mishra et al., 2019). Se han identificado diversas especies de microalgas que son eficaces en la remoción de contaminantes del agua residual en celdas de combustible microbianas (CCM), siendo las especies del género *Chlorella* las más estudiadas (Liu et al., 2021).

De acuerdo con Wang et al. (2022, p.5) la *Chlorella sp.* es una especie muy importante por sus beneficios ambientales. En sus parámetros de cultivo se tiene la temperatura que es un factor importante para su crecimiento, esta debe ser entre 21 a 27°C (Gong et al., 2021, p.3). Por otro lado, está el pH

que debe encontrarse entre 7 y 9, para tener un pH óptimo se requiere de una buena aireación (Ding et al., 2022, p.6). Por último, la luz es un nutriente importante por ende las microalgas deben absorber muy intensamente la luz, con la finalidad de generar una nueva biomasa (Zheng et al., 2022, p.7). Los resultados reportados por la literatura científica dejan evidencia del potencial de las microalgas del género *Chlorella* para la eliminación de metales pesados en aguas residuales (Hamed et al., 2022; Deng et al., 2022).

Las microalgas utilizan principalmente el mecanismo de absorción y acumulación para llevar a cabo el proceso de remoción de contaminantes (Suresh et al., 2015). El cual consiste en la unión del metal a estructuras proteicas y componentes celulares dentro de las células de la microalga que se exponen al cadmio, generalmente en forma de iones, que se encuentran en el medio acuoso (Vaz et al., 2021). Además poseen en su membrana celular receptores y canales que les permiten la absorción de los iones, que ingresan al interior de la célula a través de un proceso llamado transporte activo (Kumar et al., 2020). El metal puede someterse a procesos metabólicos, como la conjugación con antioxidantes y la formación de complejos de bajo peso molecular. Estos procesos ayudan a reducir la toxicidad del metal y a su almacenamiento seguro en el interior de la célula (Lucas, 2017, p.16).

En los últimos años, se ha llevado a cabo una extensa investigación sobre las aplicaciones de las celdas de combustible microbianas (CCM) para la eliminación de contaminantes del agua residual y la generación simultánea de bioelectricidad. Es así que, Bolognesi et al. (2022) realizaron un estudio para evaluar la eficacia de una CCM asistida por *Chlorella sp.* en la eliminación de la DQO, nitrógeno y fósforo total, además de la producción de bioelectricidad. Para ello, utilizaron aguas residuales sintéticas y dos celdas, variando las condiciones de iluminación y suministro de aceptores de electrones. Los resultados mostraron una remoción de DQO del 94%, nitrógeno del 55% y fósforo del 60%, junto con una generación de electricidad de  $5.5 \times 10^{-4}$  kWh/m<sup>3</sup>. En conclusión, se determinó que los

biocátodos con microalgas son una alternativa viable en las CCM para la eliminación de materia orgánica y nutrientes.

Por su parte, Varanasi et al. (2020) realizaron una evaluación del potencial de las CCM asistidas por la microalga *Chlorella sorokiniana* para el tratamiento de aguas residuales, la generación de energía y la producción de biomasa. El rendimiento del biocátodo de la CCM fue influenciado por el pH (7.5), la intensidad de luz ( $140 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) y el fotoperiodo (12/12). Los resultados revelaron una generación máxima de voltaje de 637 mV, una producción máxima de biomasa de 812 mg/L de células secas de la microalga y una eficiencia máxima de remoción de DQO del 95%. En conclusión, se determinó que esta tecnología tiene potencial para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales en el futuro.

Mientras que, Jaroo et al. (2019) emplearon la microalga *Chlorella vulgaris* en una CCM para generar energía y tratar aguas residuales de una refinería de petróleo. Para lo cual construyó celdas de doble cámara, en la que el compartimiento del cátodo estaba la biomasa de la microalga y en el ánodo algunas bacterias. Como resultados tuvieron que un voltaje máximo de 706 mV, y un la eliminación de la DQO del 97.33% en la cámara anódica y 79.22% en la cámara catódica. Concluyendo que una CCM ofrece un nuevo enfoque utilizando directamente la energía eléctrica generada por los microorganismo durante la oxidación de la materia orgánica del agua residual.

Abubackar et al. (2022) tuvieron como objetivo evaluar el rendimiento de un CCM de doble cámara y de cámara única con diversos materiales de electrodos para tratamiento de aguas residuales industriales de levadura. Construyeron 2 CCM de doble cámara y 2 de cámara única empleando electrodos de titanio y carbón activado con áreas de 20.5 y 31.4  $\text{cm}^2$ . Lograro fue una remoción de la DQO en un 92.2% y una densidad de potencia máxima de 51,02  $\text{mW}/\text{m}^2$ . Concluyendo que las CCM son una tecnología potencial para la eliminación de contaminantes y generación de electricidad ecológica.

### **III.METODOLOGÍA**

#### **3.1.Tipo y diseño de investigación**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

La investigación fue de tipo aplicada porque se enfocó en convertir el conocimiento teórico, en un conocimiento práctico y útil para la sociedad permitiendo su aplicación directa en la solución de una problemática ambiental (Concepción-Toledo et al., 2019). En la investigación, se buscó depurar las aguas residuales municipales y generar energía eléctrica mediante la aplicación de la biomasa de *Chlorella sp.* en CCM.

##### **3.1.2. Diseño de investigación**

El diseño de investigación fue experimental, porque se manipuló la variable independiente (biomasa de *Chlorella sp.*) para observar y analizar los efectos producidos sobre las variables dependientes (depuración del agua residual municipal y generación de energía eléctrica en CCM). Es decir, se estableció una relación causa – efecto entre la variable manipulada con las que se mantuvieron constantes (Hernández & Mendoza, 2018).

#### **3.2. Variables y operacionalización**

Se consideró como variable independiente a la biomasa de *Chlorella sp.*, mientras que las variables dependientes fueron la depuración del agua residual municipal y generación de energía eléctrica en CCM. En la tabla 15 se puede observar la matriz de operacionalización de variables.

#### **3.3. Población, muestra y muestreo**

##### **3.3.1. Población**

La Población estuvo conformada por el volumen total de aguas residuales municipales que ingresaron a la laguna de estabilización del distrito de Urpay, provincia de Pataz, departamento de La Libertad, Perú.

- **Criterios de inclusión:**

Aguas residuales municipales provenientes exclusivamente del sistema de alcantarillado del distrito de Urpay y que ingresaron a la laguna de estabilización, durante el muestreo.

- **Criterios de exclusión:**

Aguas residuales que sufrieron dilución por efecto de lluvias.

### **3.3.2. Muestra**

La muestra fue 12 litros de aguas residuales municipales no tratadas que se utilizaron en los tratamientos experimentales y en los análisis requeridos para la investigación.

### **3.3.3. Muestreo**

El muestreo utilizado fue de tipo compuesto, debido a que se tomaron 05 muestras simples de aguas residuales municipales dentro de la laguna de estabilización en un periodo de tiempo determinado y en cantidades fijas, y se homogenizaron en un solo recipiente, lo cual permitió obtener una muestra representativa con las características requeridas para la investigación.

## **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica de recolección de datos utilizada en la investigación fue la observación experimental, que consistió en observar de forma directa y sistemática los efectos de manipular la variable independiente (biomasa de *Chlorella sp.*) sobre las variables dependientes (depuración del agua residual municipal y generación de energía eléctrica en CCM), registrando los datos generados para su posterior análisis.

Asimismo, los instrumentos empleados fueron fichas de recolección de datos, en las que se plasmaron los datos obtenidos de las variables estudiadas según los objetivos de la investigación. Los instrumentos, su validez y confiabilidad se adjuntan en anexos.

## **3.5. Procedimiento**

### **3.5.1. Recolección de la muestra de aguas residuales municipales**

La muestra de aguas residuales municipales no tratadas se tomó de la laguna de estabilización ubicada en el distrito de Urcay, provincia de Pataz, departamento de La Libertad, Perú (ver Figura 1). Para la de toma de muestras se llevó a cabo de acuerdo al “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos Superficiales . R.J. N° 110 – 2016 – ANA”, y se realizó un muestreo compuesto, que consistió en tomar muestras

simples en 05 puntos de muestreo establecidos dentro de la laguna de estabilización, con un volumen fijo de 2.5 litros por cada punto, que se homogenizó en un recipiente de polietileno de alta densidad de 15 litros.

Para la conservación de las muestras se almacenaron a 4°C y fueron transportadas al Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas de la Universidad César Vallejo – Trujillo, en donde se realizó la caracterización del agua residual municipal.



*Figura 1.* Ubicación del lugar del muestreo de aguas residuales municipales. Fuente: Elaboración propia.

### **3.5.2. Caracterización de aguas residuales municipales**

Los análisis de caracterización de aguas residuales municipales se realizaron en base a los parámetros de pH, temperatura (°C), conductividad eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), potencial de oxidación y reducción (mV), oxígeno disuelto (mg/L) y sólidos totales disueltos (mg/L), que se midieron por triplicado utilizando un Medidor

Multiparámetro HI98194; turbidez (NTU) que se midió con un Turbidímetro Digital TU-2016; y la demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L) y cadmio (mg/L) se determinaron en un laboratorio externo. La DQO se midió mediante el método colorimétrico a reflujos cerrados según la norma NTP 360.502:2016 - Calidad de Agua, mientras que la concentración de cadmio se determinó por espectrometría de absorción atómica de metales por llama, de acuerdo con la norma SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3111 B, 23ª edición. Los resultados de la caracterización del agua residual municipal se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Caracterización de aguas residuales municipales.

Parámetros	Valores
pH	5.9 ± 0.01
Temperatura (°C)	23.6 ± 0.01
Conductividad eléctrica (µS/cm)	2450.48 ± 0.1
Potencial de oxidación y reducción (mV)	72 ± 1
Turbidez (NTU)	569.11 ± 0.01
Oxígeno Disuelto (mg/L)	2.89 ± 0.01
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	1849 ± 1
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	1314.73 ± 0.01
Cadmio (mg/L)	0.236 ± 0.01

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3. Preparación del medio de cultivo e inóculo de *Chlorella sp.*

Se preparó 1500 ml de medio de cultivo de *Chlorella sp.* de acuerdo a la metodología establecida por De la Cruz – Noriega et al. (2021), que consistió en una mezcla a base de cloruro de potasio (0.255 g) y urea (2.55 g) en 1500 ml de caldo de residuos de pescado previamente filtrado. La mezcla se agitó y se llenó en 3 frascos de borosilicato de 500 ml y esterilizó a 121 °C durante 30 minutos en autoclave.

Ahora bien, al medio de cultivo esterilizado se le agregó una muestra de biomasa de 850 ml de *Chlorella sp.* que fue otorgada

por el Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas de la Universidad César Vallejo, y se homogenizó para dividirlo en 4 matraces de 1000 ml, que se colocaron bajo iluminación artificial por medio de un foco LED 14W E27 y con aireación mecánica utilizando 4 bombas de aire SB-248A (3.5 L/min). Los matraces estuvieron a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.2$  °C) durante 7 días hasta que incremente la biomasa antes de iniciar con los tratamientos experimentales.

**Tabla 2.** *Características fisicoquímicas iniciales de Chlorella sp. por cada etapa operativa.*

<b>Etapa operativa</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Densidad celular (cél/ml)</b>	<b>Absorbancia (UA)</b>
1	7.86	23.6	$19308 \times 10^6$	2.918
2	7.34	22.5	$23308 \times 10^6$	3.456

Fuente: Elaboración propia.

#### **3.5.4. Fabricación de electrodos de carbón activado granular**

Se fabricaron 27 electrodos de carbón activado de  $25.35 \pm 2.70$  g de peso,  $5.2 \pm 1$  cm de diámetro y  $0.7 \pm 0.1$  cm de espesor, conectados a un alambre de cobre de 1 mm de grosor, para lo cual se trituró 500 g de carbón activado granular (GAC) (NHC-500) empleando una licuadora (Oster BPST02-BOO 600W) hasta obtener un polvo fino, al que se le agregó una mezcla de 150 g de azúcar comercial y 200 ml de agua (61° Brix). La solución se mezcló hasta obtener una pasta homogénea y consistente. Posteriormente, en un molde metálico de forma circular de 5.7 cm de diámetro y 1.2 cm de espesor, se cubrió con papel aluminio y se colocó una base metálica circular de 4.7 cm de diámetro cubierta con aceite vegetal comercial (para facilitar la extracción del electrodo del molde), luego se agregó una capa de 15 g de la mezcla, seguido por una malla de aluminio de 4.5 cm de diámetro y 1 mm de espesor entrelazado diagonalmente con un alambre de cobre, y finalmente por otra capa de 15 g de la mezcla, para luego

ser recubierto con otra base de metal. Se colocó el molde a una estufa eléctrica (Whiteline 220V/50Hz/1000W) durante 15 minutos y a una temperatura de 300 °C, luego se retiró cuidadosamente y se dejó enfriar para retirar el electrodo.

Los electrodos se impermeabilizaron para evitar que se desprendan por estar en contacto con el agua. Para ello, se empleó una solución de 250 ml de etanol y 200 g de resina de pino que previamente se hirvió durante 15 minutos con 150 ml de agua para eliminar las sustancias volátiles. Luego, los electrodos se sumergieron varias veces en la solución hasta estar completamente recubiertos y se dejaron reposar a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.5$  °C) por 24 horas.

Además, se evaluó su resistencia dentro del agua, para ello se pesó 4 electrodos impermeabilizados y uno sin impermeabilizar, y se sumergieron en un vaso de precipitado con 500 ml de agua durante 15 días. Se registró el peso final y se obtuvo el porcentaje de pérdida de peso de cada electrodo.

**Tabla 3.** *Evaluación de la resistencia de los electrodos de carbón activado en el agua.*

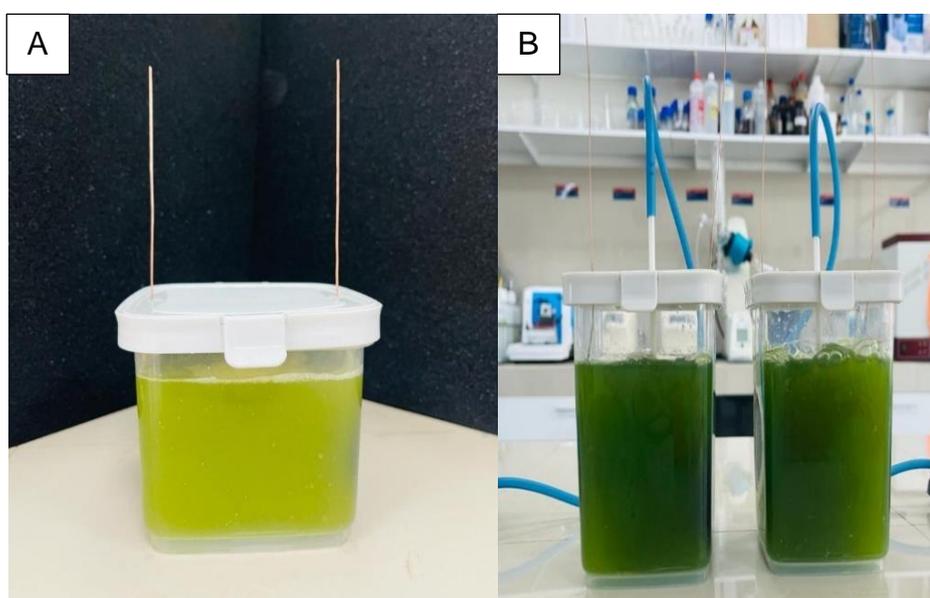
Código de electrodo	Tipo de impermeabilización	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida de peso (%)
ME1	Resina de pino	24.77	24.24	2
ME2		25.79	24.96	3
ME3		25.52	24.66	3
ME4		23.64	22.81	4
ME5	Sin impermeabilizar	24.47	21.17	13

Fuente: Elaboración propia.

Con la evaluación, se pudo corroborar que los electrodos impermeabilizados pueden resistir bajo el contacto con el agua por más de 15 días, debido a que tuvieron una mínima pérdida de peso, es por ello que, esta evaluación permitió sustentar el uso de estos electrodos fabricados para la aplicación en los tratamientos experimentales de esta investigación.

### 3.5.5. Configuración experimental de las CCM

Se fabricaron 22 celdas de combustible microbianas de cámara única empleando recipientes de polipropileno (PP-5) (ver Figura 2). Se trabajó con dos lotes de celdas por los dos tratamientos que se realizaron, el primer lote estuvo conformado por 20 CCM con una capacidad de 680 ml, y el segundo lote constituyó 2 CCM con un volumen de 1100 ml. Para los electrodos catódicos se utilizaron placas de aluminio (Al) de  $5.2 \pm 0.5$  cm de diámetro y 0.1 cm de espesor, mientras que los electrodos anódicos se fabricaron con carbón activado de  $25.35 \pm 2.70$  g de peso,  $5.2 \pm 1$  cm de diámetro,  $0.7 \pm$  y  $0.1$  cm de espesor. El área superficial de los electrodos fue de  $21.6 \pm 1.2$  cm<sup>2</sup>.



*Figura 2.* Configuración experimental de las CCM. (A) primera etapa, (B) segunda etapa. Fuente: Elaboración propia.

Los electrodos se colocaron en ambos extremos de las celdas y estuvieron conectados cada uno a un alambre de cobre (Cu) de 1 mm de grosor hacia la parte exterior. El electrodo catódico estuvo adherido a una pared interna de la celda, a la cual se le realizó un corte circular de 4.5 cm de diámetro para que el electrodo esté en contacto con el exterior, mientras que el electrodo anódico estuvo flotando al otro extremo sin estar adherido a la pared interna de la

celda. Asimismo, las tapas de las celdas también fueron de PP-5, con un anillo de sellado de goma a prueba de fugas. Se realizó dos orificios en los extremos para la salida del alambre de cobre, y uno en el centro para el ingreso de la manguera de aireación.

### 3.5.6. Operación de las CCM

El procedimiento experimental se dividió en dos etapas. Para la primera etapa operativa, se trabajó la biomasa de *Chlorella sp.* en concentraciones de 10%, 20% y 30% para evaluar el rendimiento en la remoción de cadmio del agua residual municipal en diferentes pH 6.5, 7.0 y 7.5, y para la generación de electricidad en las CCM. Para ello, se dividió la muestra de agua residual en volúmenes de 2400 ml, 3400 ml y 2400 ml, y se ajustó el pH con Hidróxido de Sodio (NaOH) 1N hasta obtener valores de 6.5, 7.0 y 7.5, respectivamente.

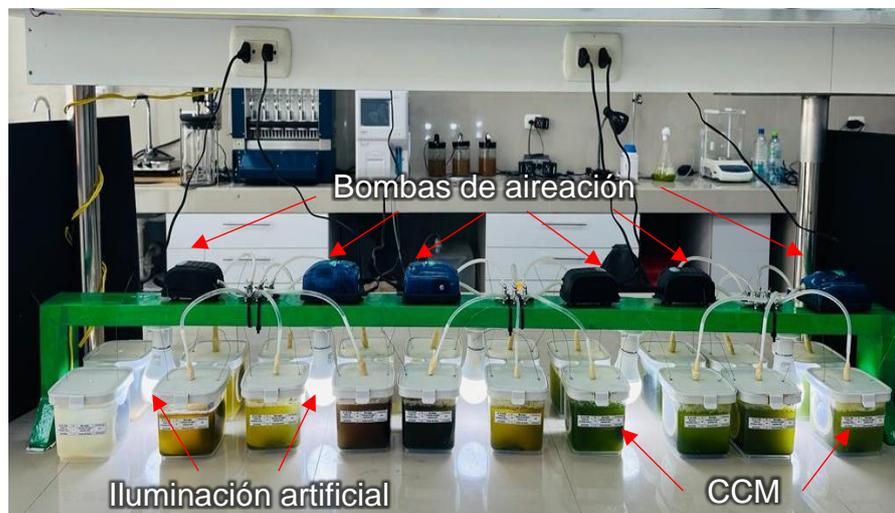
Se tuvieron 9 tratamientos diferentes y un blanco, y se trabajó por duplicado (20 CCM en total). Cada celda tuvo un volumen de trabajo de 500 ml, del cual se dividió entre la dosis de biomasa que fue de 50, 100 y 150 ml (10%, 20% y 30%, respectivamente) y el volumen de agua residual municipal. En la siguiente tabla se observa las características de la primera etapa operativa:

**Tabla 4.** Características de la primera etapa operativa.

Código de celda	Dosis (%)	Agua residual (ml)	pH del agua residual	Tiempo (días)
CCM 1	10	450	6.5	25
CCM 2	10	450	7.0	25
CCM 3	10	450	7.5	25
CCM 4	20	400	6.5	25
CCM 5	20	400	7.0	25
CCM 6	20	400	7.5	25
CCM 7	30	350	6.5	25
CCM 8	30	350	7.0	25
CCM 9	30	350	7.5	25
CCM Blanco	0	500	7.0	25

Fuente: Elaboración propia.

Además, se establecieron las siguientes configuraciones operacionales para la primera etapa operativa: las 20 CCM estuvieron a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), bajo iluminación artificial por medio de 5 focos LED 9W E27 y con aireación mecánica utilizando 6 bombas de aire SB-248A (5 L/min) durante los 25 días de operación. Se utilizó una bomba de aire por cada 3 celdas inoculadas con la microalga, mientras que a los blancos no se suministró aireación. En la Figura 3, se muestra las configuraciones operacionales establecidas para la primera etapa operativa.



*Figura 3.* Configuración operacional de las CCM en la primera etapa operativa. Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar con la primera etapa operativa, se determinó que en las CCM con la dosis de biomasa al 30% y en un agua residual municipal con pH de 7.5, se tuvo el mejor desempeño en la remoción de cadmio del agua residual, y en la generación de electricidad. Por ello, se replicó la concentración de dosis (30%) y pH (7.5) para la segunda etapa operativa con un volumen mayor de agua residual (525 ml) y en un tiempo de evaluación de 15 días, y se evaluó su desempeño en la remoción de cadmio, DQO, sólidos totales disueltos, turbidez y conductividad del agua residual, y también en la generación de electricidad en las CCM.

En la Tabla 5 se puede observar las características de la segunda etapa operativa:

**Tabla 5.** Características de la segunda etapa operativa.

Código de celda	Dosis (%)	pH del agua residual	Agua residual (ml)	Tiempo (días)
CCM A	30	7.5	525	15
CCM B	30	7.5	525	15

Fuente: Elaboración propia.

En esta fase, las 2 celdas estuvieron a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.2$  °C), con iluminación artificial a través de 1 foco LED 14W E27 y con aireación mecánica utilizando 1 bomba de aire SB-248A (3.5 L/min) por cada celda durante los 15 días de operación.



*Figura 4.* Configuración operativa de las CCM en la segunda etapa operativa. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.7. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual

Para la primera etapa operativa, el pH del agua residual se monitoreo empleando un Medidor Portátil PT-380 y la turbidez (NTU) se midió con un Turbidímetro Digital TU-2016. Todas las mediciones se realizaron por triplicado diariamente a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.5$  °C) durante 25 los días.

Mientras que para evaluar la concentración final de cadmio (mg/L) se tomó una muestra de 200 ml de agua residual al día 25 de monitoreo, y se analizó externamente en un laboratorio utilizando espectrometría de masas (Método EPA 200.8, Revisión 5.4, 1994), dado que se necesitaron volúmenes de agua residual relativamente mayores para este análisis, las mediciones de cadmio se realizaron solo al inicio y al final del tratamiento.

Para la segunda etapa, se monitoreó el pH, conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), oxígeno disuelto (mg/L) y sólidos totales disueltos (mg/L) utilizando un Medidor Multiparámetro HI98194; y la turbidez (NTU) que se midió con un Turbidímetro Digital TU-2016. Se tomaron mediciones por triplicado diariamente a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durante 15 días. Por su parte, para evaluar la concentración de Cd (mg/L) y la DQO (mg/L), se tomaron muestras de 50 ml y 10 ml, respectivamente, al día 3, 6, 9, 12 y 15 de monitoreo, y se preservaron en condiciones de  $-22 \text{ }^\circ\text{C}$  para ser analizados externamente al final del tratamiento en un laboratorio. La DQO se midió por medio del método colorimétrico a reflujo cerrado (NTP 360.502:2016 - Calidad de Agua), y el Cd se determinó mediante espectrometría de masas (Método EPA 200.8, Revisión 5.4, 1994).

Para determinar el porcentaje de remoción de la DQO, Cd, sólidos totales disueltos y turbidez, se calculó siguiendo la ecuación descrita por López et al (p.4, 2022):

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100 \dots(1)$$

### **3.5.8. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM**

Los parámetros electroquímicos de voltaje (mV) e intensidad de corriente (mA) de las CCM se midieron con un Multímetro Digital Truper MUT – 830, y se utilizaron las siguientes resistencias externas:  $1.92 \pm 0.08$ ,  $10 \pm 1.81$ ,  $50 \pm 1.2$ ,  $100 \pm 4.3$ ,  $200 \pm 9.8$ ,  $300 \pm 8$ ,  $500 \pm 15$ ,  $750 \pm 18$ ,  $800 \pm 10$  y  $1000 \pm 40 \ \Omega$ .

Todas las mediciones se realizaron diariamente a temperatura de ambiente ( $22 \pm 1.5$  °C) durante 25 días para la primera etapa operativa y durante 15 días para la segunda etapa operativa.

### **3.5.9. Identificación bioquímica de los microorganismos del ánodo**

Al finalizar con la segunda etapa operativa, se tomaron muestras de los electrodos anódicos de las CCM por medio de la técnica de hisopado y se preservaron en amies líquidos estériles por 24 horas a 4°C. Luego, se prepararon cultivos en medio Agar MacConkey y Agar Sabouraud con 4% de glucosa para el aislamiento de los microorganismos. Las muestras inoculadas se sembraron en placas Petri por el método de estría y se incubaron durante 24 - 48 horas a 35 °C. Se realizaron cultivos puros y se codificaron las cepas como CCMA-1 y CCMB-1.

Para la identificación bioquímica se llevó a cabo con el Autoanalizador Microbiológico VITEK-2 Compact. Para lo cual, se realizó la suspensión de las cepas en dos tubos de ensayo con solución salina estéril y se homogenizaron. Después, se midió la densidad óptica con el Densichek Plus VITEK-2 por el método de McFarland, hasta que las dos cepas se encuentren en el rango de 0.50 a 0.63. Posterior a ello, se colocó las tarjetas de identificación y los tubos de ensayo con la suspensión en el casete del Autoanalizador Microbiológico VITEK-2 Compact. Se configuró la densidad óptica a una longitud de onda de 660 nm, y dentro del patrón McFarland (0.50 - 0.63). El tiempo de análisis para la identificación de las bacterias fue de aproximadamente 6.8 horas. Finalmente, se realizaron lecturas en el microscopio donde se observaron las características morfológicas y microscópicas de los microorganismos identificados mediante la tinción de Gram.

### **3.5.10. Análisis de las características de los electrodos de carbón activado**

Después de recolectar las muestras del ánodo de las celdas de combustible microbianas (CCM) en la segunda etapa operativa,

se realizaron análisis utilizando técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y la Espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS). Estos análisis permitieron examinar la morfología y composición elemental de la superficie de los electrodos. Además, se empleó la técnica de Espectroscopía por Transformada de Fourier (FTIR) para identificar la composición química de la biopelícula adherida en los electrodos.

### **3.6. Método de análisis de datos**

Los datos recolectados de las mediciones realizadas en los tratamientos experimentales de las CCM fueron procesados utilizando el software Microsoft Excel. Este programa facilitó la organización y agrupación de la información de acuerdo a cada objetivo, siguiendo las fichas de recolección de datos para su posterior análisis estadístico.

Para analizar los datos, se empleó el software estadístico InfoStat, el cual permitió realizar un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los distintos tratamientos aplicados en la remoción de contaminantes del agua residual. Posteriormente, se llevó a cabo la prueba LSD Fisher para identificar las diferencias específicas entre los distintos tratamientos y determinar la dosis óptima de *Chlorella sp.*, el pH ideal del agua residual y el tiempo apropiado en la eliminación de Cd y DQO.

Por último, los gráficos fueron elaborados utilizando el programa OriginPro9, teniendo en cuenta cada parámetro evaluado y en concordancia con los objetivos de la investigación.

### **3.7. Aspectos éticos**

El trabajo se desarrolló con el estricto apego a los principios éticos en investigación, lo que aseguró la fiabilidad de los hallazgos obtenidos. Además, se respetó la autoría de los investigadores consultados, y se aseguró de que se citaran correctamente siguiendo los lineamientos de la ISO 690 y 690-2 de la UCV.

Finalmente, se ha respetado rigurosamente la integridad de los datos recopilados, asegurando que no se han manipulado de ninguna manera, y se han procesado con el máximo cuidado para garantizar su validez.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Efecto de la dosis de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio en aguas residuales municipales en CCM

Se evaluó el efecto de la biomasa de *Chlorella sp.* en la eliminación de cadmio del agua residual municipal durante un período de tratamiento de 25 días. La concentración del metal se evaluó al inicio y al final del tratamiento. En la siguiente figura se observa la remoción de cadmio a diferente dosis de *Chlorella sp.* aplicada en cada celda:

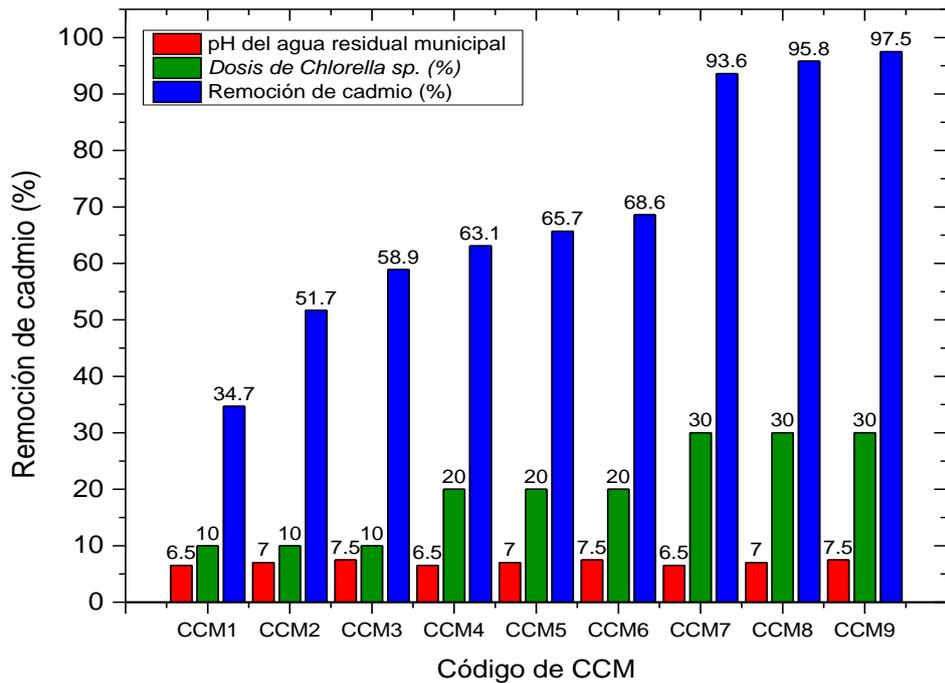


Figura 5. Remoción de cadmio del agua residual municipal por diferente dosis de *Chlorella sp.* aplicada en cada CCM.

Con el fin de determinar la dosis óptima de *Chlorella sp.* en la remoción de Cd del agua residual, se utilizó la prueba de LSD Fisher, que permitió identificar si existen diferencias significativas entre cada dosis aplicada en los tratamientos mediante la comparación de las medias de remoción. Con todo y lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis:

**H<sub>0</sub>:** La remoción de Cd del agua residual es igual por cada dosis de *Chlorella sp.* aplicada.

**H<sub>1</sub>:** La remoción de Cd del agua residual no es igual por cada dosis de *Chlorella sp.* aplicada.

En las siguientes tablas se presentan los análisis de varianza y la prueba LSD Fisher utilizada para determinar la dosis óptima de *Chlorella sp.* en la eliminación de Cd del agua residual municipal:

**Tabla 6.** Análisis de varianza (SC tipo III) para la eliminación de cadmio por diferente dosis aplicada de *Chlorella sp.*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15560.09	3	5186.70	85.32	<0.0001
Dosis de <i>Chlorella sp.</i>	15560.09	3	5186.70	85.32	<0.0001
Error	972.69	16	60.79		
Total	16532.78	19			

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6, se observa que el valor de  $p < 0.05$ , por lo que se acepta la hipótesis alternativa: La remoción de cadmio del agua residual no es igual por cada dosis de *Chlorella sp.* aplicada. Además, se tiene una diferencia altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) entre cada dosis aplicada.

**Tabla 7.** Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS=11.68769) para la remoción de cadmio por diferente dosis de *Chlorella sp.* aplicada.

Dosis de <i>Chlorella sp.</i>	Medias de remoción de cadmio (%)	n	E.E.	
Sin inóculo	0.64	2	5.51	A
10% inóculo	48.80	6	3.18	B
20% inóculo	62.57	6	3.18	C
30% inóculo	96.12	6	3.18	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, la Tabla 7 muestra que con los tratamientos con la dosis al 30% de *Chlorella sp.* se obtuvo el nivel más alto en la eliminación del cadmio del agua residual, con una media de porcentaje de remoción del 96.12%, seguido por la dosis al 20% con una media de eliminación del 62.47%; y por la dosis al 10% con una remoción promedio del 48.80%.

#### 4.2. Efecto del pH del agua residual municipal en la remoción de cadmio usando la biomasa de *Chlorella sp.* en CCM

También se evaluó el efecto del pH del agua residual municipal en la eliminación del Cd usando la biomasa de *Chlorella sp.* durante 25 días de tratamiento. En la siguiente figura se observa la remoción de cadmio por diferente pH evaluado del agua residual en cada celda:

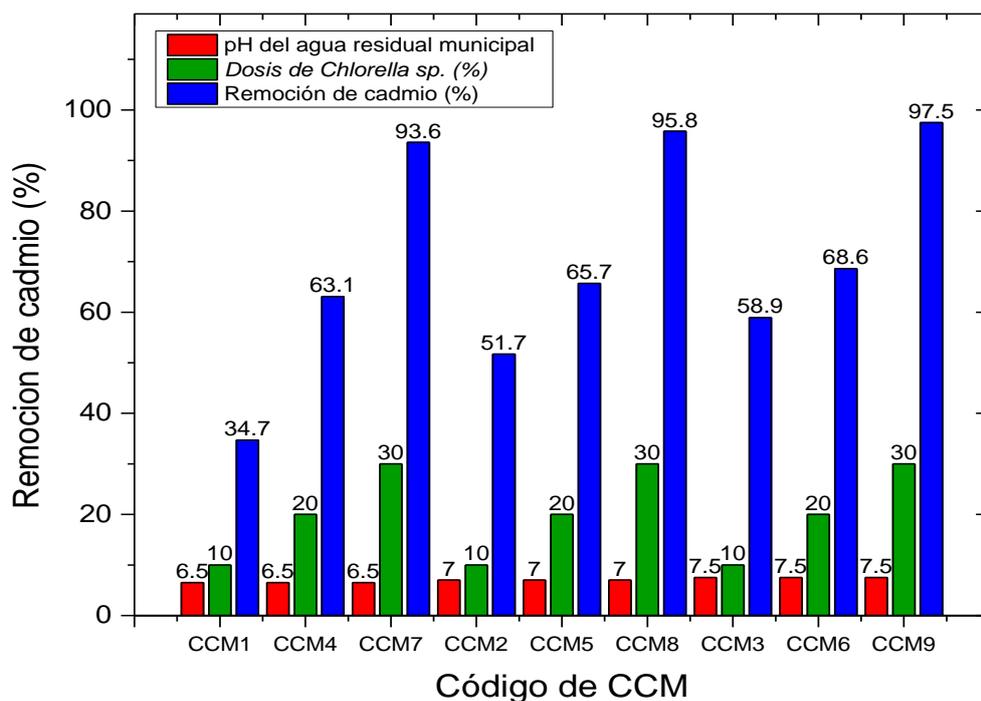


Figura 6. Remoción de cadmio del agua residual municipal a diferente pH evaluado del agua residual en cada CCM.

Para determinar el mejor pH del agua residual municipal evaluado para la eliminación de Cd, se utilizó la misma prueba estadística de LSD Fisher que permitió identificar las diferencias significativas entre los diferentes pH evaluados en los tratamientos mediante la comparación de las medias de remoción. En base a lo anterior, se formularon las siguientes hipótesis:

**H<sub>0</sub>:** La remoción de Cd es igual a diferente pH evaluado del agua residual municipal.

**H<sub>1</sub>:** La remoción de Cd no es igual a diferente pH evaluado del agua residual municipal.

En las siguientes tablas se observan los resultados de los análisis de varianza y la prueba LSD Fisher:

**Tabla 8.** *Análisis de varianza (SC tipo III) para la remoción de cadmio a diferente pH del agua residual municipal.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	606.71	2	303.35	0.61	0.5569
pH del agua residual	606.71	2	303.35	0.61	0.5569
Error	7473.43	15	498.23		
Total	8080.13	17			

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8, se observa que el valor de  $p > 0.05$ , por lo que se acepta la hipótesis nula: La remoción de cadmio es igual a diferente pH evaluado del agua residual municipal. Además, se tiene que las medias de remoción no son significativamente diferentes ( $p > 0.5569$ ) entre cada pH evaluado.

**Tabla 9.** *Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS=34.53829) para la remoción de cadmio a diferente pH del agua residual municipal.*

<b>pH</b>	<b>Medias de remoción de cadmio (%)</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
6.50	61.30	6	9.11	A
7.00	71.05	6	9.11	A
7.50	75.14	6	9.11	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Fuente: Elaboración propia.

Además, en la Tabla 9 se muestra que los tratamientos a diferente pH del agua residual municipal evaluado no presentaron diferencias significativas, pues se observa que los tratamientos que se trabajaron a pH inicial de 7.5 lograron una media de eliminación del 75.14%, mientras que a un pH inicial de 7.0 se tuvo un porcentaje de remoción promedio del 71.05%, y a un pH inicial de 6.5 la media de remoción fue de 61.30%.

#### 4.3. Efecto del tiempo en la eliminación de Cd y DQO a las condiciones óptimas de pH del agua residual y dosis de *Chlorella sp.* en CCM

Se evaluó el efecto del tiempo en el proceso de degradación de cadmio a las condiciones óptimas de pH del agua residual (7.5) y dosis de biomasa de *Chlorella sp.* (30%) en CCM, además se evaluó su influencia en la eliminación de la DQO. Para ello, se evaluó la concentración de Cd y DQO a intervalos de 3 días durante 15 días de tratamiento.

En la siguiente figura se observa la remoción de cadmio a través del tiempo por cada CCM inoculada con la biomasa de *Chlorella sp.* al 30% y en un agua residual municipal con pH inicial de 7.5:

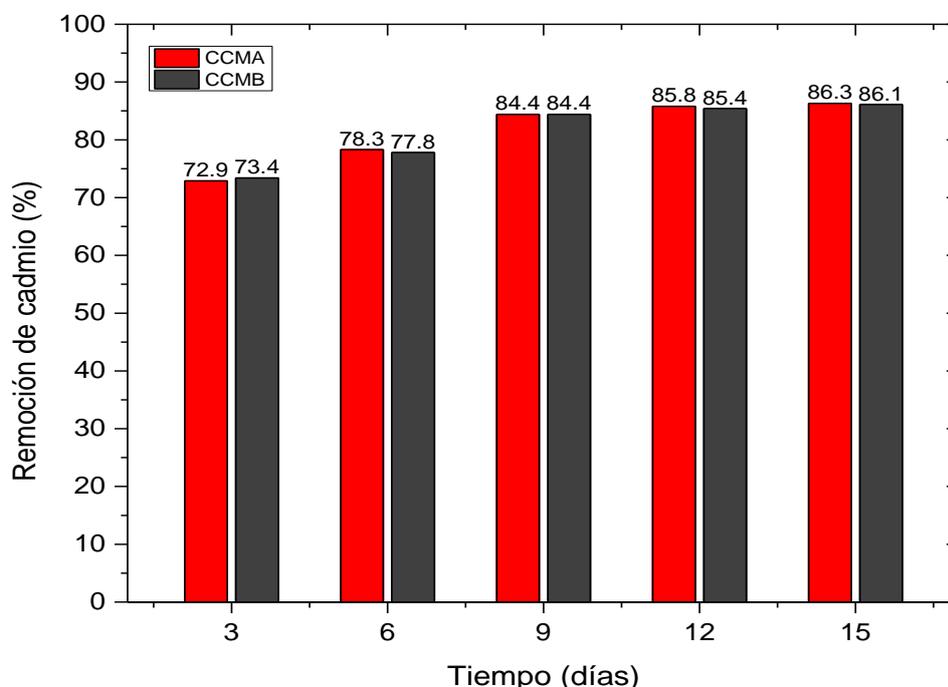


Figura 7. Remoción de Cd a través del tiempo por cada CCM inoculada con *Chlorella sp.* al 30% en agua residual municipal con pH inicial de 7.5.

Para determinar el efecto del tiempo en la degradación del cadmio se utilizó la prueba de LSD Fisher que permitió identificar las diferencias significativas entre los diferentes días evaluados mediante la comparación de las medias de remoción. En base a lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis:

**H<sub>0</sub>:** La remoción de Cd del agua residual municipal es igual en cualquier día evaluado de tratamiento.

**H<sub>1</sub>:** La remoción de Cd del agua residual municipal es diferente en cualquier día evaluado de tratamiento.

En las siguientes tablas se observan los resultados del análisis de varianza y la prueba LSD Fisher para determinar el efecto del tiempo en la remoción de cadmio:

**Tabla 10.** *Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la remoción de cadmio a través del tiempo.*

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	252.94	4	63.24	1677.13	<0.0001
Tiempo (días)	252.94	4	63.24	1677.13	<0.0001
Error	0.19	5	0.04		
Total	253.13	9			

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, se observa que el valor de  $p < 0.05$ , por lo que se acepta la hipótesis alternativa: La remoción de cadmio del agua residual municipal es igual en cualquier día evaluado de tratamiento. Además, se tiene una diferencia altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) entre cada día evaluado.

**Tabla 11.** *Prueba LSD Fisher (Alfa=0.05 DMS= 0.49915) para la remoción de cadmio a través del tiempo.*

<b>Días de monitoreo</b>	<b>Medias de remoción de cadmio (%)</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
3	73.14	2	0.14	A
6	78.11	2	0.14	B
9	84.36	2	0.14	C
12	85.36	2	0.14	D
15	86.19	2	0.14	E

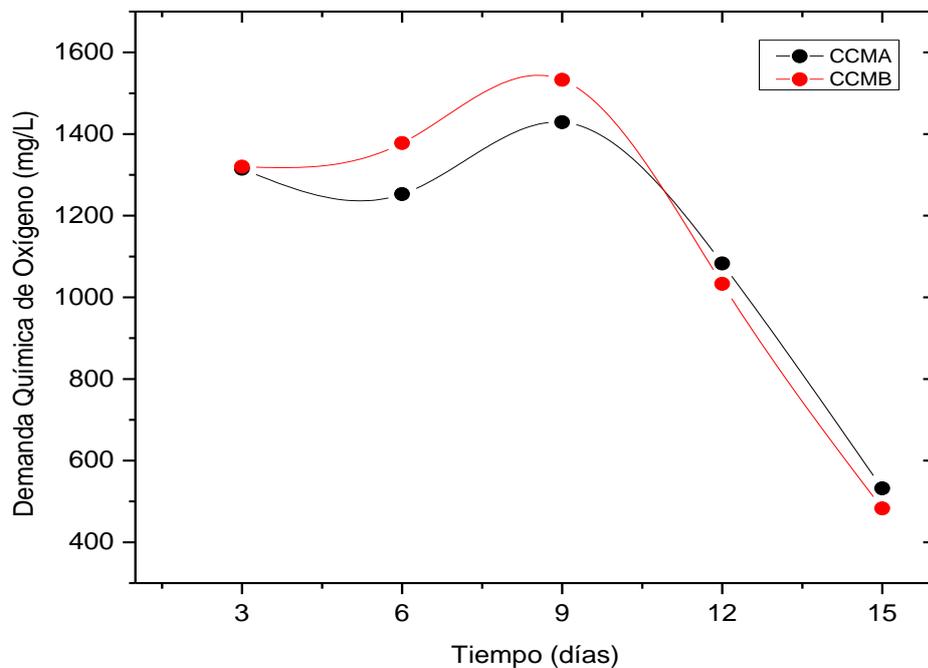
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 11 se observa que al día 15 de tratamiento se logró la mayor remoción del Cd del agua residual municipal, con una media de porcentaje de remoción del 86.19%, seguido por el día 12, 9, 6 y 3, con medias de eliminación de cadmio de 85.36%, 84.36%, 78.11% y 73.14%, respectivamente.

En relación a la demanda química de oxígeno (DQO), se realizaron mediciones en los días 3, 6, 9, 12 y 15 para evaluar su variación durante el periodo de tratamiento a causa de la aplicación de la biomasa de *Chlorella sp.* al 30% en un agua residual con pH inicial de 7.5.

La siguiente figura muestra la evolución de la DQO durante los días de medición por cada celda:



*Figura 8.* Monitoreo de la concentración de la DQO a través del tiempo por cada CCM inoculada con *Chlorella sp.* al 30% en agua residual municipal con pH inicial de 7.5.

#### 4.4. Producción de energía eléctrica en CCM durante los tratamientos experimentales

Se evaluó la producción de energía eléctrica en las celdas como proceso complementario a la remoción de Cd y DQO del agua residual municipal. No se evaluó el efecto de la biomasa de *Chlorella sp.* en la generación de energía eléctrica en CCM, si no el potencial de producción energética de las celdas con electrodos de carbón activado y aluminio utilizando como sustrato agua residual municipal inoculada con *Chlorella sp.*

Para ello, se monitorearon los parámetros de voltaje y corriente eléctrica todos los días durante el periodo de tratamiento de la primera y segunda etapa operativa. En la siguientes figuras se presentan los datos registrados del voltaje y corriente eléctrica generada por las celdas en la primera etapa experimental:

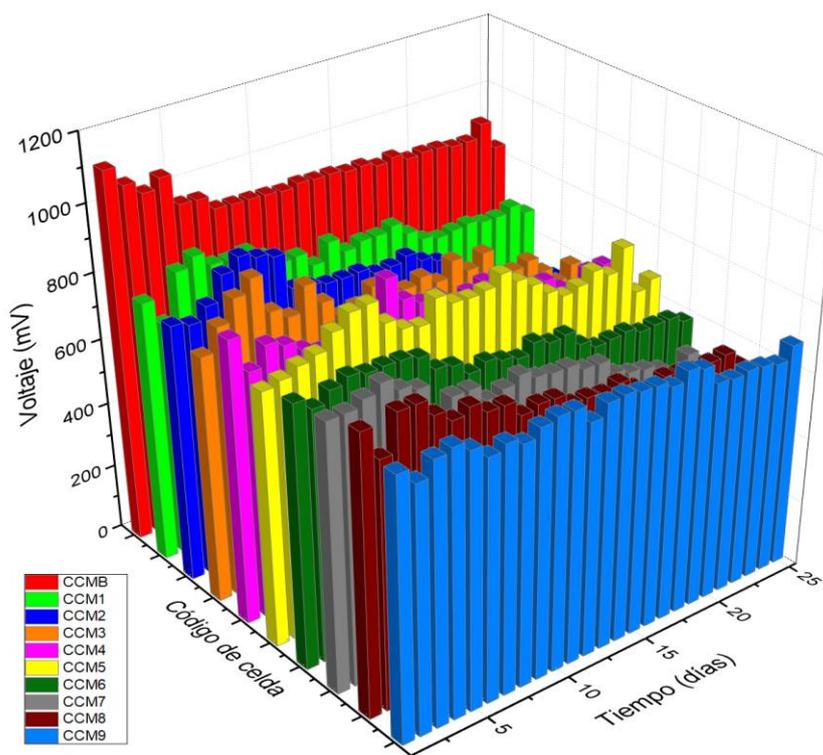


Figura 9. Monitoreo del voltaje generado por las CCM durante la primera etapa operativa.

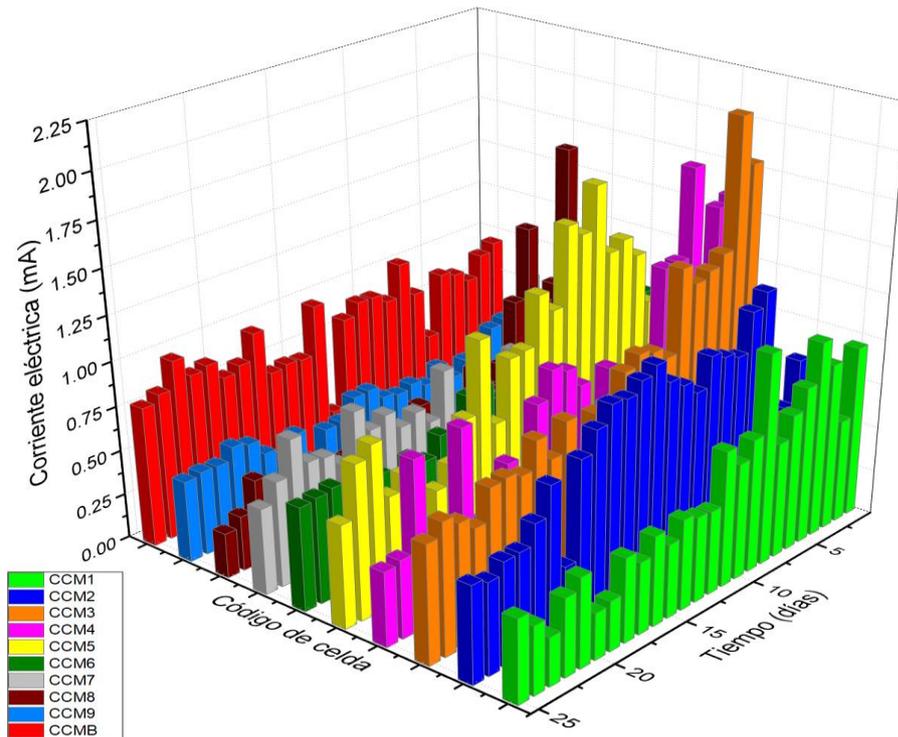


Figura 10. Monitoreo de la corriente eléctrica generada por las CCM durante la primera etapa operativa.

Por su parte, los datos del voltaje y corriente eléctrica producida por las celdas en la segunda etapa operativa se muestran a continuación:

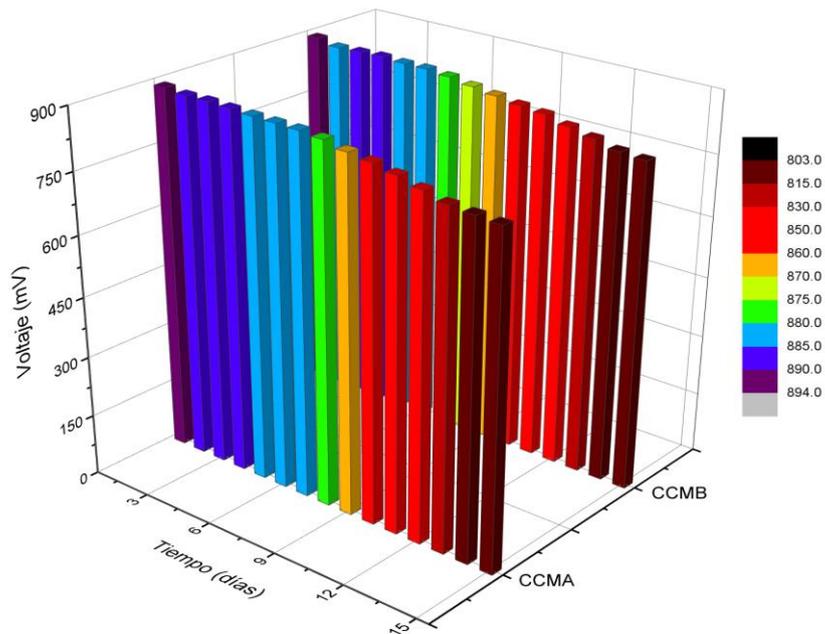


Figura 11. Monitoreo del voltaje generado por las CCM durante la segunda etapa operativa.

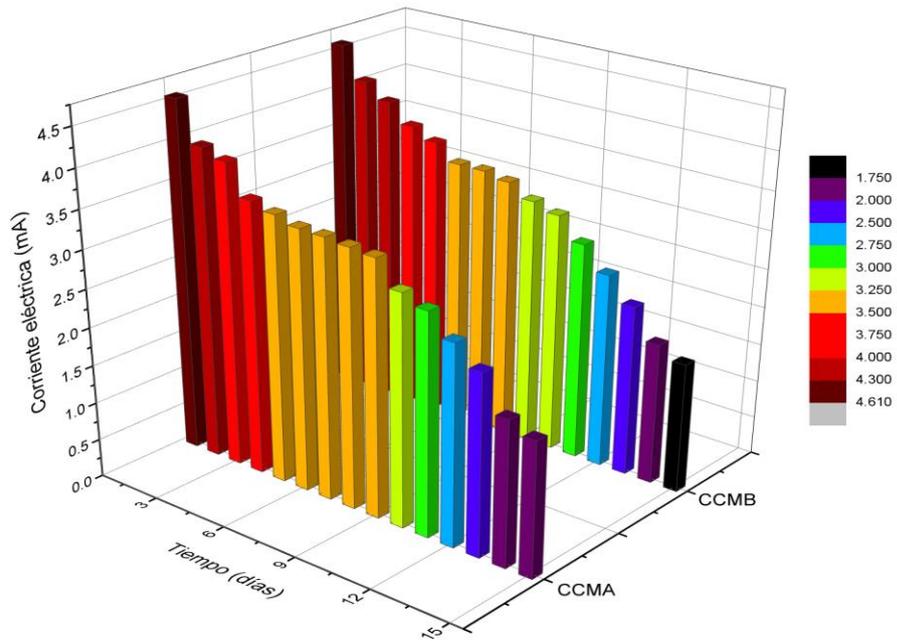


Figura 12. Monitoreo de la corriente eléctrica generada por las CCM durante la segunda etapa operativa.

#### 4.5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual municipal durante los tratamientos experimentales

Se llevó a cabo el seguimiento del pH del agua residual municipal durante los 25 días. En la figura 13 se muestran los valores registrados:

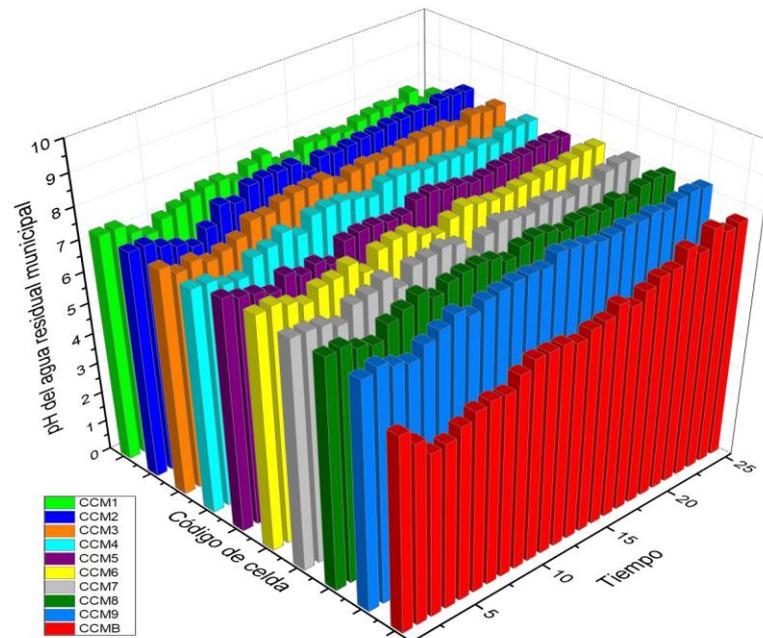


Figura 13. Monitoreo del pH del agua residual municipal por cada CCM durante la primera etapa operativa.

Además, en la siguiente figura se muestran los datos del monitoreo de la turbidez por cada CCM durante 25 días:

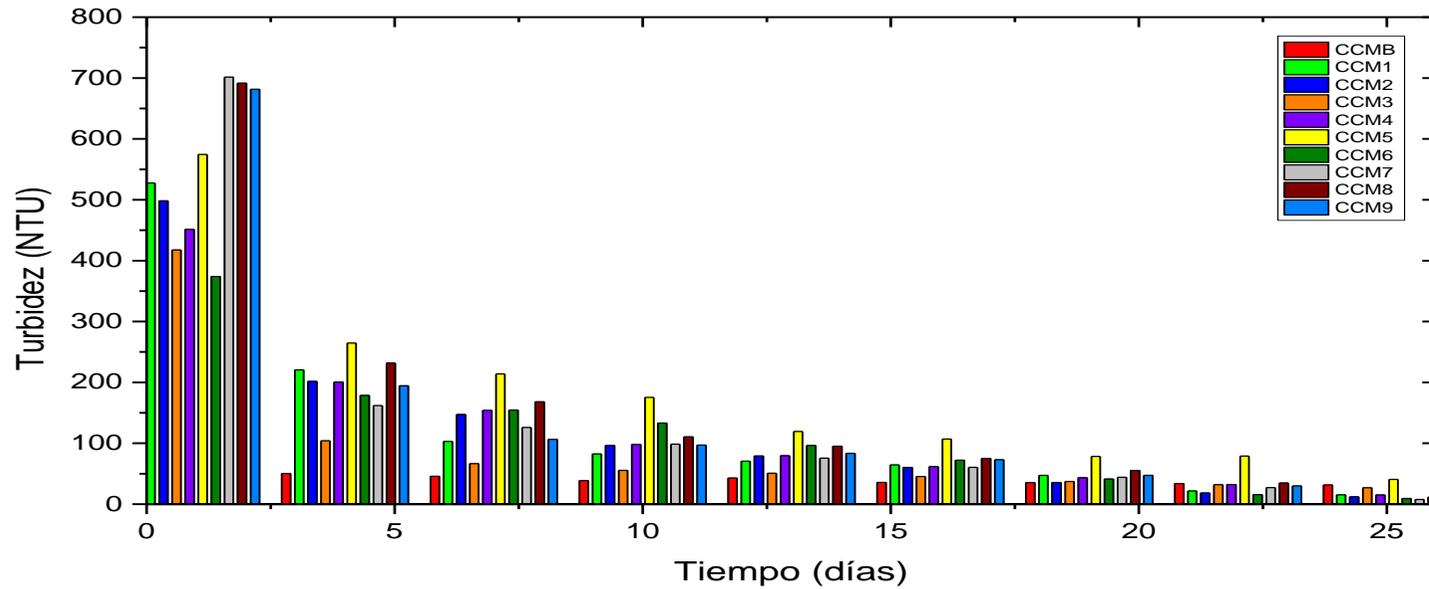


Figura 14. Variación de turbidez del agua residual municipal por cada CCM en la primera etapa operativa.

Asimismo, la tabla 12 presenta los resultados de la remoción de los parámetros fisicoquímicos del agua residual en la segunda etapa operativa:

Tabla 12. Remoción de los parámetros fisicoquímicos del agua residual municipal por cada celda en la segunda etapa.

Código de celda	Dosis (ml)	pH inicial del agua residual	Remoción de los parámetros fisicoquímicos (%)					Incremento del Oxígeno Disuelto (%)
			Cadmio	DQO	Turbidez	Sólidos Totales Disueltos	Conductividad eléctrica	
CCM A	225	7.5	86.27	59.54	85.68	53.05	59.59	82.05
CCM B	225	7.5	86.10	63.26	79.94	58.14	64.46	90.48

Fuente: Elaboración propia.

En la segunda etapa operativa, también se llevó un monitoreo del pH del agua residual de las celdas A y B, además de la turbidez. En las siguientes figuras se muestran los valores registrados durante los 15 días de tratamiento de la segunda etapa:

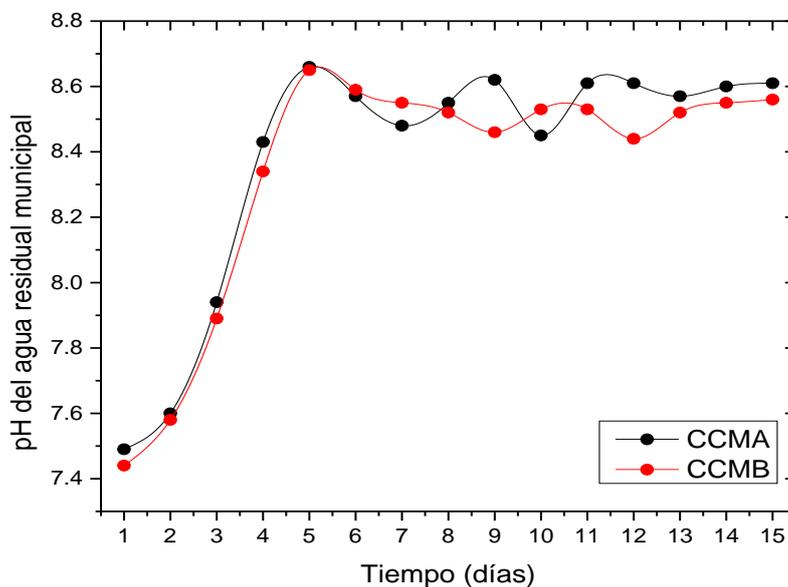


Figura 15. Monitoreo del pH del agua residual municipal por cada CCM durante la segunda etapa operativa.

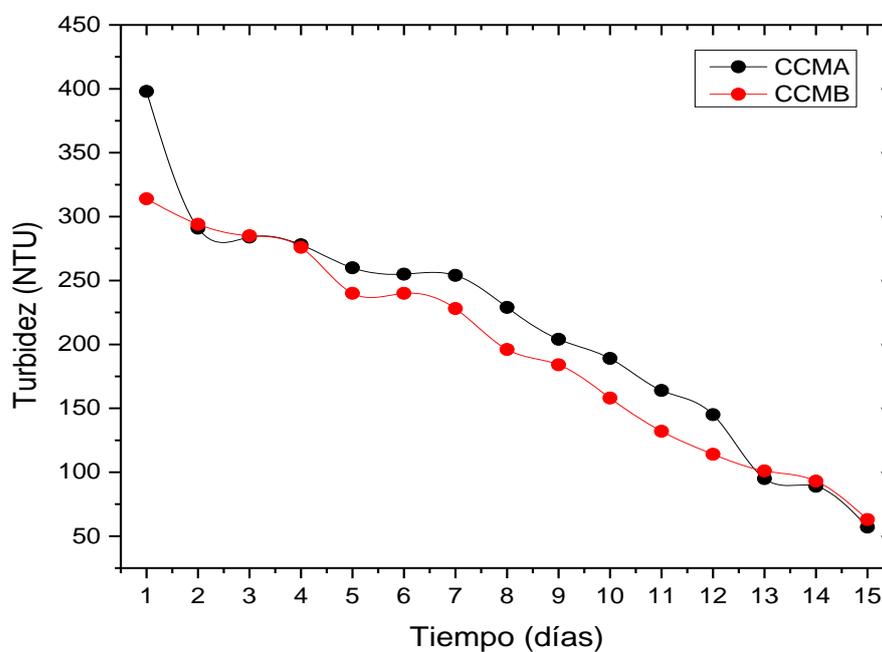


Figura 16. Variación de turbidez del agua residual municipal por cada CCM en la segunda etapa operativa.

#### 4.6. Identificación bioquímica de los microorganismos del ánodo de las CCM de la segunda etapa operativa

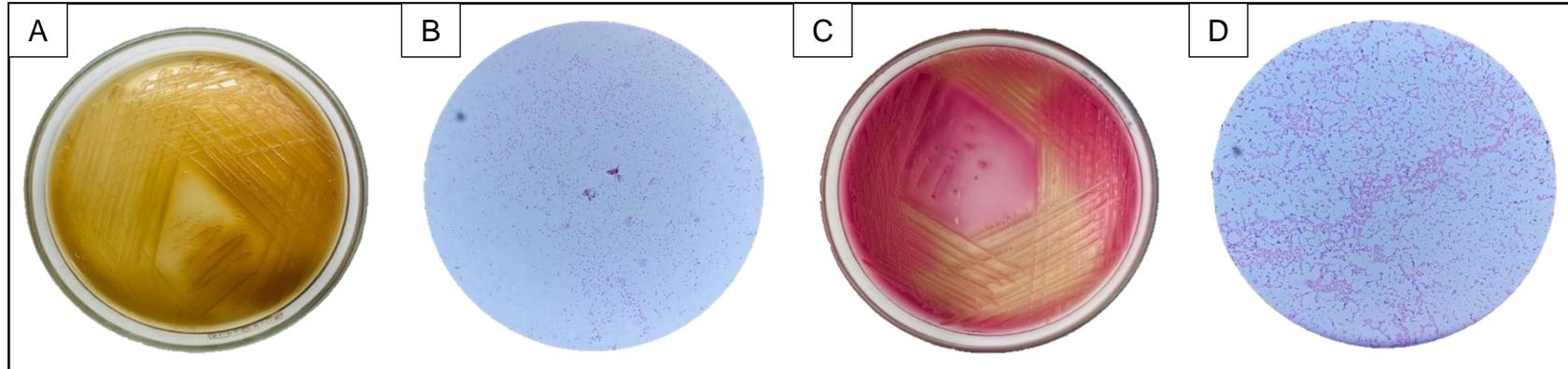
En la tabla 13, se muestran los microorganismos identificados de los electrodos anódicos de las celdas A y B al finalizar la segunda etapa operativa:

**Tabla 13.** Microorganismos identificados en el ánodo de las CCM al finalizar la segunda etapa operativa.

Código de cepa	Especie identificada	Tipo de microorganismo	Características microscópica	Identidad (%)	Bionúmero
CCMA-1	<i>Pseudomonas putida</i>	Bacteria	Bacilo Gram negativa	99.00	0003011103500350
CCMB-1	<i>Klebsiella oxytoca</i>	Bacteria	Bacilo Gram negativa	99.00	6705734657164010

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se observa los microorganismos aislados en su medio de cultivo y su observación microscópica.



**Figura 17.** Microorganismos aislados del ánodo de las CCM. (A) Colonia de *Pseudomonas putida* en medio Agar Sabouraud con 4% de glucosa, y (B) Observación microscópica (100x) de *Pseudomonas putida*. (C) Colonia de *Klebsiella oxytoca* en medio Agar MacConkey, y (D) Observación microscópica (100x) de *Klebsiella oxytoca*.

#### 4.7. Análisis SEM, EDS y FTIR de los electrodos de carbón activado de las CCM de la segunda etapa operativa

Al finalizar con la segunda etapa operativa, se realizaron análisis SEM y EDS para determinar la composición de los electrodos de carbón activado utilizados en las CCM. En la siguiente figura se observa los resultados del análisis SEM por cada celda:

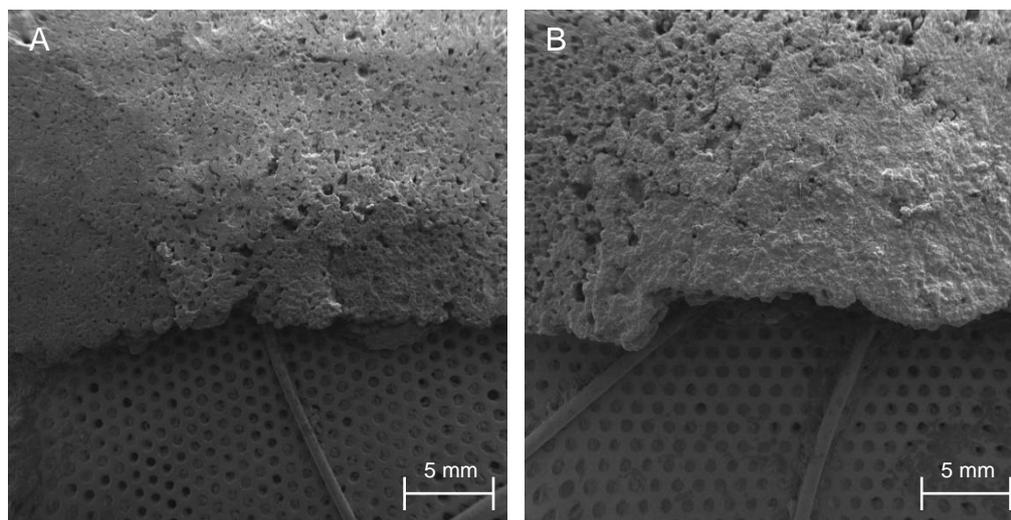


Figura 18. Análisis SEM de los electrodos de carbón activado A) CCMA, y B) CCMB correspondiente a la segunda etapa operativa.

En la Figura 19 se observan los resultados del análisis EDS para el electrodo de carbón activado de la CCMA, y en la Figura 18, el correspondiente a la CCMB:

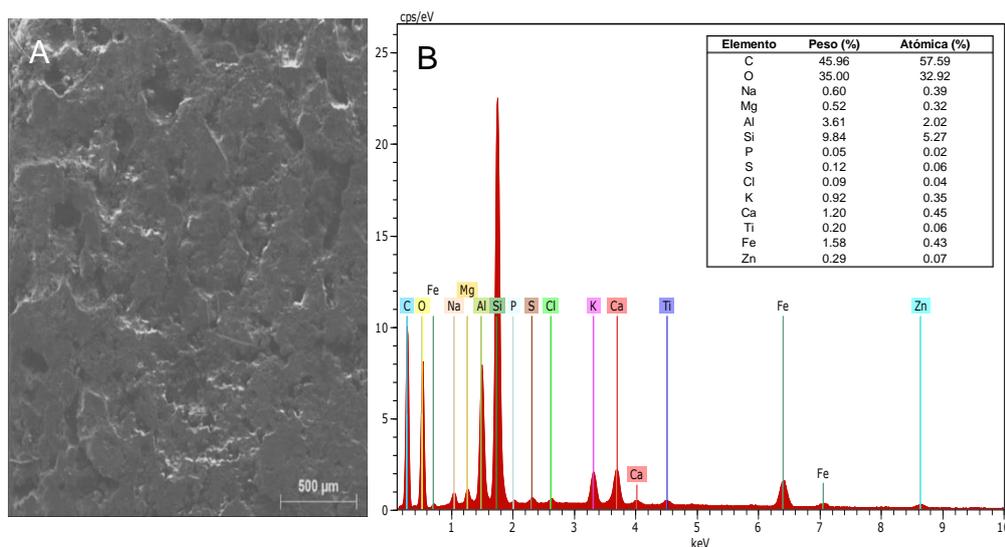


Figura 19. A) Micrografía y B) Análisis EDS del electrodo de carbón activado de la CCMA correspondiente a la segunda etapa operativa.

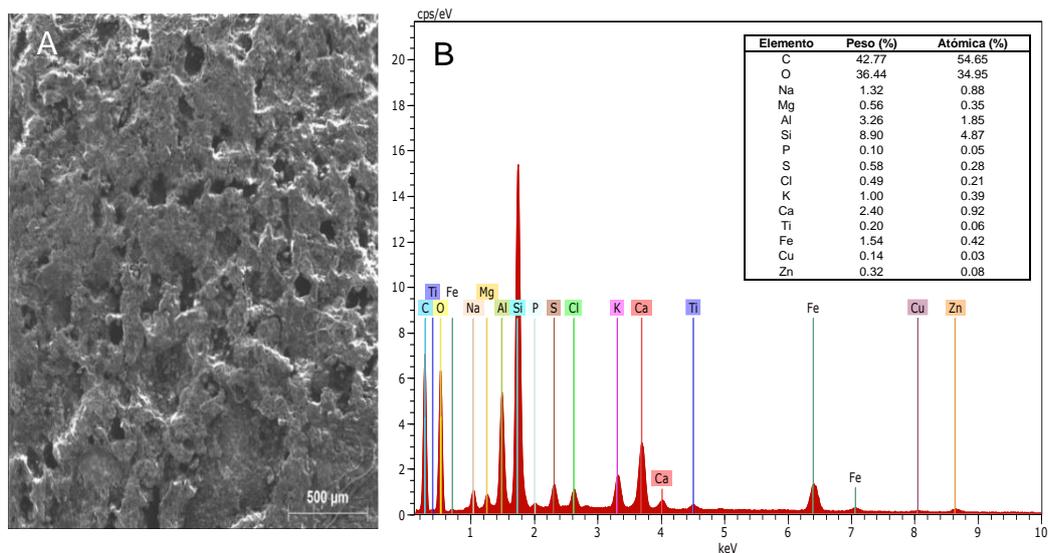


Figura 20. A) Micrografía y B) Análisis EDS del electrodo de carbón activado de la CCMB correspondiente a la segunda etapa operativa.

Asimismo, en la siguiente figura se observa los resultados del análisis FTIR realizados al término de la segunda etapa operativa, para determinar las propiedades químicas de cada célula de *Chlorella sp.*:

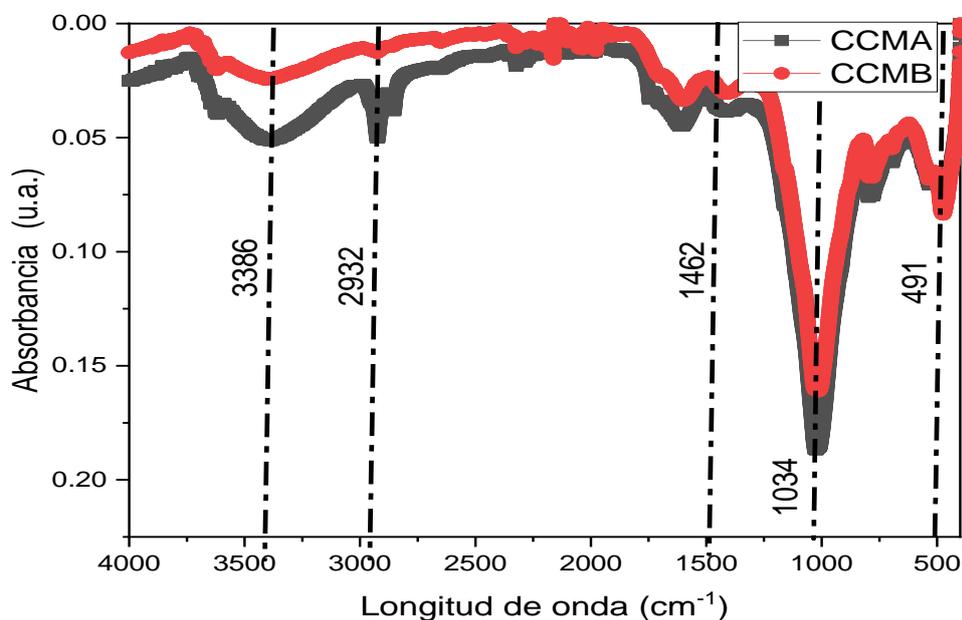


Figura 21. Espectros de absorbancia de *Chlorella sp.* en CCMA y CCMB por FTIR durante la segunda etapa operativa.

## V. DISCUSIÓN

En la Figura 5, se observan los porcentajes de eliminación de cadmio del agua residual municipal por cada dosis aplicada de *Chlorella sp.* en las CCM. Se muestra que en la CCM 7, 8 y 9 donde se aplicó una dosis de biomasa de *Chlorella sp.* de 150 ml (30%) se logró la mayor reducción del metal, alcanzando porcentajes de remoción de 93.6%, 95.8% y 97.5%, respectivamente. Mientras que en las celdas inoculadas con dosis de 100 ml (20%) y se obtuvieron niveles de remoción del 63.1% (CCM4), 65.7% (CCM5) y 68.6% (CCM6). Finalmente, en las CCM 1, 2 y 3, la dosis suministrada fue de 50 ml (10%) y los porcentajes de eliminación fueron 34.7%, 51.7% y 58.9%, respectivamente. Los valores máximos de remoción obtenidos en esta investigación son superiores a los descritos por otros investigadores como Zhang et al. (2018) que obtuvieron un eliminación máxima de Cd del 95% usando *Chlorella sp. QB-102* en el biocátodo de CCM de doble cámara. Mientras que Singh & Kaushik (2021) removieron el metal en un 87% de aguas residuales de destilería usando CCM de cámara doble con sedimento de humedales. Por su parte, Abourached, Catal & Liu (2014) lograron eficiencias promedio de eliminación de cadmio del 89% en CCM de cámara única con cátodo de aire inoculadas con un cultivo bacteriano mixto a partir de lodos de aguas residuales.

Con respecto a las Tabla 6 y 7, mediante la prueba LSD Fisher se evidencia que existe una diferencia altamente significativa entre los niveles de remoción de cadmio del agua residual obtenidas por cada dosis aplicada de *Chlorella sp.*, y se muestra que los tratamientos usando la mayor dosis (30%) presentaron la mejor eficacia en la eliminación del metal. Se han reportado investigaciones como la de Jaafari & Yaghmaeian (2019) que utilizaron *Chlorella coloniales* en dosis de 1-3 g/L para eliminar metales pesados en una solución acuosa (5-15 mg/L), y demostraron que a medida que se aumenta la dosis de microalgas aplicada en el tratamiento se incrementa el porcentaje de eliminación de Cd (97.05%). Del mismo modo, Lui et al., (2023) utilizaron *Chlorella sorokiniana* para la eliminación de Cd (II) en concentración inicial de 100 mg/L en una solución sintética, y obtuvieron que

al aumentar la biomasa de algas se logra un mayor efecto en la remoción llegando a eliminar el 72.83% del metal.

Por su parte, en la Figura 6 se observa los porcentajes de remoción de cadmio a los diferentes valores de pH del agua residual evaluados en cada CCM. Se aprecia que en las celdas donde se trabajó con pH inicial de 6.5, se obtuvieron remociones del 34.7% (CCM1), 63.1% (CCM4) y 93.6% (CCM7). En las celdas CCM2, CCM5 y CCM8 el pH inicial fue de 7, y se logró obtener niveles de remoción del 51.7%, 65.7% y 95.8%, respectivamente. Mientras que en las celdas con pH de 7.5 se removió el Cd en un 58.9% (CCM3), 68.6% (CCM6) y 97.5% (CCM9). Asimismo, se observa que los resultados de remoción no variaron notoriamente cuando se aplicaron dosis de *Chlorella sp.* del 20% y 30%, pero si se tuvieron diferencias significativas cuando la dosis fue del 10%. Chiranjeevi & Patil (2020) demostraron que los procesos metabólicos y bioquímicos de las microalgas se ven favorecidos cuando el agua residual se trabaja con valores de pH de 7 - 8. Los resultados se contrastan con los obtenidos por Abourached, Catal & Liu (2014) que lograron una remoción del cadmio del 89% trabajando a un pH de 7.1 del agua residual. Además, Commault et al., (2017) trabajaron con CCM de doble cámara inoculadas con *Chlorella vulgaris* en el cátodo y un medio sintético de etanol y agua dulce con pH de 7.5 en el ánodo, y lograron eliminar  $0.19 \text{ gL}^{-1}\text{d}^{-1}$  de la DQO.

De los resultados de la prueba LSD Fisher que se muestran en las Tablas 8 y 9, se observa que no existen diferencias significativas entre los niveles de remoción de cadmio obtenidas a diferentes valores de pH del agua residual evaluados. Aun así se tiene que los tratamientos con pH inicial de 7.5 lograron el mejor despeño en la eliminación del Cd con una media del 75.14%. Ribeiro et al., (2022) observaron una tendencia similar en su investigación, debido a que no presentaron diferencias significativas en el pH evaluado en las CCM para la eliminación de fósforo, nitrógeno y carbono orgánico total del agua residual ( $p > 0.05$ ). Así mismo, el pH juega un papel crucial en la eliminación de contaminantes mediante una CCM asistida por microalgas. Esto se debe a que el pH regula el equilibrio del crecimiento de

las microalgas para generar biopelículas activas en el cátodo, lo cual facilita la eliminación de los contaminantes (Christhwardana et al., 2020). La mayoría de los estudios han revelado que el rango del pH del agua residual de 6-8 resulta óptimo para un rendimiento sobresaliente de las CCM en la generación de energía (Varanasi et al., 2020; Elshobary et al., 2021) y para la actividad metabólica de los microorganismos en la remoción de los contaminantes presentes en el sustrato (Saran et al., 2023). Además Varanasi et al. (2020), siguieron que *Chlorella sp.* crece sobresalientemente en un pH de 7.5 – 8, y su proceso metabólico se ve desfavorecido fuera de ese rango.

De acuerdo con la Figura 7, la remoción de cadmio en el agua residual municipal aumentó progresivamente a medida que transcurrían los días. En el tercer día de tratamiento, se logró eliminar aproximadamente el 72.9% del metal en la CCM A y el 73.4% en la CCM B, y al llegar al día 15 la remoción alcanzó el 86.27% en la CCM A y el 86.10% en la CCM B. Estos resultados indican que se obtiene una mayor remoción de Cd cuando se prolonga el tiempo de tratamiento, superando el 86.10% después de 15 días y llegando a eliminar el metal en un 97.67% en 25 días. Esto se sustenta en los hallazgos de Jaafari & Yaghmaeian (2019), quienes demostraron que el porcentaje de eliminación de Cd en CCM asistidas con *Chlorella coloniales* aumentó a medida que se incrementó el tiempo de reacción, alcanzando un máximo de aproximadamente el 92.2% después de 100 horas, para luego disminuir de manera gradual y constante. Además, Nayak & Ghosh (2019) informaron que la remoción de la DQO en CCM inoculadas con *Scenedesmus abundans*, aumentó progresivamente durante los días 10 y 15 del tratamiento de 21 días, logrando una eliminación máxima del 77%.

Ahora bien, de la prueba LSD Fisher que se detalla en las Tablas 10 y 11, se observa que existen diferencias muy significativas entre los niveles de remoción de cadmio obtenidas en los diferentes días de tratamiento evaluados, y se alcanza una mayor remoción del Cd cuando el periodo de tratamiento es mayor. Tal como afirman Zhao et al., (2023), en su estudio determinaron que la adsorción del Cd por *Chlorella* aumenta conforme

transcurre el tiempo de adsorción, lo que se traduce en una eliminación efectiva del metal cuando se prolonga el periodo de tratamiento logrando remover más del 95%.

Por otra parte, con respecto a la demanda química de oxígeno, se aprecia en la Figura 8 que durante los primeros 9 días de tratamiento la DQO aumento hasta valores de 1429 mg/L y 1533 mg/L en las CCM A y CCM B, respectivamente. Sin embargo, en los días posteriores se observó una disminución considerable con el pasar del tiempo llegando al día 15 a presentar valores de 532 mg/L (CCMA) y 483 mg/L (CCMB). Los resultados muestran similitud con los encontrados por Sorgato et al., (2023) que reportaron incrementos de la DQO en los primeros días de operación de sus CCM de cátodo de aire. El aumento de la DQO en el agua residual depende de varios factores. La DQO es una medida que indica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual mediante procesos químicos (De Castro et al., 2023). Cuando se agregan microalgas al agua residual, estas pueden consumir parte de los compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis, lo que podría resultar en una disminución de la DQO (Sikkandhar et al., 2022). Sin embargo, si la concentración de microalgas es alta y hay una abundante presencia de materia orgánica, la demanda de oxígeno para la descomposición por las microalgas puede superar el efecto de reducción de la DQO, lo que podría resultar en un aumento neto de la DQO (Nayak & Ghosh, 2019).

En cuanto a la generación de energía eléctrica en las CCM se monitorearon los valores de voltaje y corriente durante el periodo de tratamiento. En la Figura 9 se observa los valores de registrados del voltaje producido por las celdas durante los 25 días de operación de la primera etapa. Se aprecia que la celda CCM Blanco presentó el mejor rendimiento en la generación de voltaje a lo largo de los 25 días, alcanzando su valor máximo en el primer día con 1118.5 mV, y posteriormente experimentó una tendencia a disminuir a medida que transcurrían los días. Al finalizar el período de monitoreo, la celda generó un voltaje de 833 mV. Los valores máximos de voltaje obtenidos en esta investigación fueron superiores a los descritos por otros

autores como Hou et al., (2016) que lograron generar 260 mV en CCM con inóculo de *Chlorella vulgaris*. Por su parte, Huarachi-Olivera et al., (2018) produjeron 954 mV en CCM asistidas con *Chlorella vulgaris*.

Mientras que el voltaje máximo generado por las demás celdas que fueron inoculadas con *Chlorella sp.*, se observaron registros destacados en diferentes días. Por ejemplo, la celda CCM3 alcanzó su máximo voltaje de 918 mV en el día 4, mientras que la celda CCM2 generó 911 mV en el día 5, y la celda CCM5 registró 900 mV en el día 7. Mientras que los valores mínimos se registraron en el día 25, por las celdas CCM7, CCM8 y CCM5, que generaron 463.5 mV, 507 mV y 572 mV, respectivamente. Los resultados evidencian que todas las celdas presentaron un rendimiento óptimo en la generación de voltaje durante los primeros días de operación. Sin embargo, se observó una disminución gradual en su producción a medida que transcurrían los días. Diversas investigaciones han reportado un aumento en las primeras semanas y una disminución en los días posteriores, lo que se debe a que las bacterias pasaron por una etapa de aclimatación para la formación del biofilm (Cora et al., 2021). Así mismo, también se relaciona con la disminución de materia orgánica debido a que la misma materia es consumida por los microorganismos en su proceso metabólico (Rojas-Flores et al., 2023).

Además, en la Figura 10 se puede observar que las celdas CCM3 y CCM5 destacaron por su buen desempeño en la generación de corriente durante la primera etapa, alcanzando valores máximos de 2.15 mA y 1.79 mA en los días 4 y 8, respectivamente. No obstante, a medida que avanzaba el tiempo, se observó una disminución en su producción eléctrica. Por otro lado, las demás celdas generaron corrientes que se situaron en el rango de 0.5 mA - 1.5 mA durante los primeros días de operación, pero también experimentaron una disminución en su producción a medida que transcurrían los días. En el día 25, se registraron valores mínimos de corriente en las celdas CCM8 (0.25 mA) y CCM4 (0.42 mA), respectivamente. Otras investigaciones también mostraron una disminución de corriente en los últimos días por ejemplo Commault et al., (2017) reportó una reducción en la

corriente a causa de la disminución en la actividad microbiana o una disminución en la eficiencia de transferencia de electrones en la biopelícula. Así mismo, Rojas-Flores et al., (2023) mencionan que a medida que disminuye la materia orgánica presente en el medio, se tendrá una disminución de electrones, lo que trae consigo una disminución en la generación de corriente eléctrica.

En la Figura 11 se observa que, durante los primeros días de operación de la segunda etapa se tuvo los valores más altos de voltaje y en los últimos días los valores más bajos. Por ejemplo, en el día 1 las CCM A y CCM B lograron producir 892 mV y 894 mV, respectivamente, siendo estos valores los máximos registrados en esta parte de la investigación. Mientras que los valores mínimos se registraron al día 15 con 807 mV y 803 mV por las CCM A y CCMB, respectivamente. Como lo indican Sikkandhar et al., (2022) las pérdidas de voltaje son inevitables en el metabolismo bacteriano debido a la forma en que las bacterias obtienen energía a través de la oxidación de sustratos.

De igual manera, la generación de corriente eléctrica en la segunda etapa se muestra en la Figura 12, y se aprecia que fue mayor durante los primeros días de operación y fue disminuyendo conforme transcurrió el tiempo. Los valores picos se registraron al día 1, con 4.57 mA y 4.61 mA por las CCM A y CCMB, respectivamente. Mientras que los valores más bajos se tuvieron al día 15, donde se registraron 1.77 mA (CCMA) y 1.71 mA (CCMB). Además se observa un incremento notorio en la producción de corriente por las celdas A y B en comparación con la CCM9, debido a que las tres celdas se trabajaron a las mismas condiciones de pH inicial del agua residual y dosis suministrada de *Chlorella sp.*, solo lo que varió fue que las CCMA y B el volumen de trabajo fue mayor. Los resultados obtenidos son mayores a los de otros autores como Agüero-Quiñones et al., (2022) que produjeron 0.08 mA en CCM de cámara única con aguas residuales municipales y menores a los reportados por De la Cruz-Noriega et al., (2022) que obtuvieron una generación de corriente de 7.59 mA en CCM usando residuos de mango y *Spirulina sp.*

En la Figura 13, se observó que conforme pasó los días el pH del agua residual fue cambiando, mostrando una clara tendencia a incrementarse en todas las celdas; sin embargo, al día 25 del tratamiento, se mantuvo dentro del rango permitido por el ECA-Agua (7.5 – 8.5). En las celdas inoculadas con *Chlorella sp.* la tendencia de la variación del pH fue similar, mientras que en la CCM Blanco se mantuvo por debajo de los demás valores. Como señalan Sharma et al., (2022) si el pH inicial del agua residual es <7.5, después de unos días de funcionamiento de las CCM, el pH aumentará debido a que el intercambio de protones dentro de la CCM es más lento que la tasa de producción originado durante la oxidación de la materia orgánica realizada por los microorganismos (Gupta et al., 2021). En otras investigación se demostraron un incremento gradual del pH con el transcurso del tiempo de tratamiento, Varanasi et al., (2020) observaron un aumento del pH del agua residual de 7 – 9 con el pasar de los días en CCM asistidas por *Chlorella sorokiniana*.

Por otro lado, en la Figura 14 se observa que en todas las celdas inoculadas con *Chlorella sp.* mostraron porcentajes de eliminación bastante considerables de la turbidez. Por ejemplo, las CCM 7, 8 y 9 lograron remover 98.9%, 98.34% y 98.88%, respectivamente, siendo estos valores los más altos alcanzados en la remoción de este parámetro. Mientras que las demás CCM presentaron niveles de remoción entre 92.52% - 97.62%. En cuanto a la CCM Blanco, logró una remoción del 44.78%. Con todo lo anterior, se observa que la turbidez se logró disminuir hasta los niveles permitidos por el Estándar de Calidad Ambiental para Agua ECA-Agua (<100 NTU) en todas las celdas. Los resultados se asemejan con los obtenidos por Lutterbeck et al., (2022), que eliminaron la turbidez de aguas residuales generadas en la lavandería de un hospital usando CCM en un 99.9%, atribuyendo la remoción de la turbidez a causa de la eliminación de la materia orgánica y material en suspensión con el transcurso de los días.

Así mismo, en la Tabla 12 se observa los porcentajes de remoción (cadmio, DQO, turbidez, sólidos totales disueltos y conductividad) e incremento (oxígeno disuelto) obtenidos en la segunda etapa operativa por cada CCM.

Se observa un remoción considerable de cadmio en las CCMA (86.27%) y CCMB (86.10%) que fue menor a los reportados por Zhang et al. (2018) que eliminaron el 95% del Cd usando *Chlorella sp.* QB-102 en CCM de doble cámara; además de la turbidez que removió en un 85.68% y 79.94% en las celdas A y B, respectivamente. Pei-Fang, et al., (2017) lograron eliminar la turbidez en un 96%. En los demás parámetros la remoción no fue tan sobresaliente. Por ejemplo, la DQO se eliminó en un 59.54% (CCMA) y 63.26% (CCMB) que fue similar a los obtenidos por Sikkandhar et al., (2022) removiendo el 69.44% de la DQO en de aguas residuales de productos lácteos usando CCM asistidas con *Coelastrella sp.*; los sólidos totales disueltos se eliminaron en un 53.05% (CCMA) y 58.14% (CCMB), que fueron muy inferiores a los resultados obtenidos por Chauhan et al., (2022), que logró eliminarlos en un 94% de aguas residuales de curtiduría usando CCM de doble cámara; y la conductividad eléctrica se removió en un 59.59% (CCMA) y 64.56% (CCMB) resultados que fueron superados por los descritos en la investigación de Sharma et al., (2022) que eliminaron en un 99.83% usando *Chlorella vulgaris* en CCM. Por su parte, el oxígeno disuelto se logró incrementar muy notoriamente con niveles de 82.05% y 90.48% en las CCMA y CCMB, respectivamente. Raju et al., (2021) logró aumentar el oxígeno disuelto de 8 mg/L a 3,7 mg/L en 30 días de tratamiento usando CCM con agua residual de levadura de panadería.

El monitoreo del pH del agua residual de las celdas en la segunda etapa se muestra en la Figura 15. Se observa un incremento notorio del pH hasta el día 5 en ambas celdas y luego una variación entre valores de 8.4 – 8.7. Gupta et al., (2021) también observaron un incremento del pH de 6.68 – 8.21 en el efluente de la cámara catódica de sus CCM, lo cual se debió a la reacción de reducción de oxígeno que fue facilitada por la presencia de protones y el amortiguador de CO<sub>2</sub>.

En la Figura 16 se observa los valores de turbidez registrados durante los 15 días de tratamiento de la segunda etapa operativa. Se aprecia una disminución progresiva con el transcurso de los días, pasando de tener 398 NTU (CCMA) y 314 NTU (CCMB) en el primer día, a 57 NTU (CCMA) y 63

NTU (CCMB) al día 15. Sallam et al., (2021) también reportaron una reducción de la turbidez con el pasar de los días.

Los resultados de la identificación bioquímica de los microorganismos presentes en las cepas CCMA-1 y CCMB-1 de la segunda etapa operativa se muestran en la Tabla 13. Los microorganismos identificados fueron *Pseudomonas putida* y *Klebsiella oxytoca*, respectivamente, con una similitud del 99%. La bacterias del género *Pseudomonas* son conocidas por sus capacidades metabólicas versátiles para degradar una amplia gama de compuestos orgánicos del agua residual debido a su capacidad para utilizar diversas fuentes de carbono y su tolerancia a las duras condiciones ambientales (Yang et al., 2021). Mientras que *Klebsiella oxytoca* tiene buena capacidad para degradar compuestos orgánicos de aguas contaminadas como hidrocarburos, compuestos fenólicos y otros compuestos orgánicos tóxicos (Chauhan et al., 2022).

Agregando a lo anterior, en la Figura 17 se observan las características microscópicas de los microorganismos. Se puede apreciar que la *Pseudomonas putida* se presenta en forma de bastones cortos o alargados, con forma cilíndrica o ligeramente curvada. Mientras que *Klebsiella oxytoca* tiene forma de bacilo, con una forma alargada y cilíndrica y se agrupan en cadenas o en pares.

La Figura 18 presenta las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de los electrodos de carbón activado utilizados en la segunda etapa. Estas imágenes revelan que la superficie de los electrodos era relativamente lisa y se observó la presencia de partículas sólidas de carbón activado dispersas por la superficie, así como restos de la biopelícula de la microalga adherida durante el tratamiento. También se pueden observar la estructura de malla de aluminio y el alambre de cobre que están impregnados en el centro del electrodo. Se han reportado otros hallazgos como los de Song et al., (2020) que en el análisis SEM de su electrodo de fieltro de carbono mostraron una superficie lisa con presencia de grandes espacios entre las fibras que dificultaba el enriquecimiento de microorganismos.

Además, en las Figuras 19 y 20 se presentan las imágenes microscópicas y los análisis de espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS), se muestran los espectros de composición de los elementos presentes en los electrodos de carbón activado de las CCMA y CCMB, respectivamente. En la micrografía de los electrodos, se observan poros y gránulos irregulares de carbón activado distribuidos en toda la superficie del electrodo. Los análisis EDS revelaron que la composición elemental fue similar en ambos electrodos, y se tuvo una mayor presencia de elementos como carbono, oxígeno, silicio, aluminio, calcio y hierro. Así mismo, cabe destacar que no se encontró presencia de cadmio. Lui, Lu & Zhang (2022) también obtuvieron resultados similares en los análisis EDS de su electrodo anódico de fieltro de grafito, evidenciando presencia mayoritaria de carbono, oxígeno, platino, silicio, aluminio y hierro. Mientras que Silveira, Sidney de Aquino & Schneedorf (2020) reportaron mayor incidencia de carbono, oxígeno y hierro en su electrodo de fibra de carbono.

Finalmente, la Figura 21 muestra los espectros de absorbancia de *Chlorella sp.* en CCMA y CCMB por FTIR de la segunda etapa operativa. Se observa que el pico más intenso en  $3367\text{ cm}^{-1}$  pertenece a los enlaces O-H de los compuestos fenólicos; y  $3386$  y  $2932\text{ cm}^{-1}$  pertenece a los fuertes enlaces C-H de los alcanos. Mientras que el rango de  $1462$  y  $1034\text{ cm}^{-1}$  se identificó el compuesto alqueno (enlace C=C), pertenecientes a los enlaces  $\text{NO}_2$  y C-H, respectivamente. Los picos que se notan más en el espectro se ven disminuidos con respecto al espectro final, lo cual se debe a la degradación del sustrato en el proceso de generación de energía eléctrica durante su funcionamiento, ya que los microorganismos utilizan muchos de estos compuestos como alimento para su funcionamiento (Omenesa et al., 2022). Otros autores como Romadhoni et al., (2022) en su investigación informaron mediante el espectro FTIR del adsorbente (MOF tipo HKUST-1, UiO-66 y ZIF-8) para eliminar el Cr (VI) en una CCM, la presencia de enlaces atómicos de Zn-N a través del ligando 2-metilimidazol, grupo de ácido carboxílico (C-OH), carboxilato (O-H), enlaces aromáticos derivados de la estructura del benceno (C=C) y enlaces carbonilo (C=O).

## VI. CONCLUSIONES

1. Se observó un efecto favorable al utilizar diferentes dosis de biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de Cd y DQO en aguas residuales municipales mediante el uso de CCM. Se alcanzó una alta eficiencia de eliminación de cadmio, así como una reducción significativa de la DQO. Además, se registraron valores altos de voltaje y corriente, indicando una generación sobresaliente de energía eléctrica.
2. Los tratamientos con dosis del 30% de biomasa de *Chlorella sp.* presentaron efectos más significativos en la eliminación del Cd del agua residual con un promedio de remoción del 96.12% en 25 días, en comparación a los tratamientos con dosis al 10% y 20% que tuvieron un menor eficacia en la remoción del metal. Esto sugiere que al aumentar la cantidad de dosis aplicada, se logra una eliminación más efectiva del cadmio presente en el agua residual.
3. Los tratamientos a diferentes pH evaluados del agua residual no mostraron diferencias significativas en la remoción de cadmio del agua residual cuando se aplicaron dosis de *Chlorella sp.* del 20% y 30%, pero si se tuvieron diferencias notorias con dosis al 10%. Aun así, los tratamientos a un pH de 7.5 lograron una mayor eliminación del Cd en comparación con los demás valores de pH evaluados con un promedio de remoción del 75.14%.
4. Existe una mayor remoción de cadmio cuando se prolonga el periodo de tratamiento, lo cual se evidencia al alcanzar el día 15 de tratamiento, donde se observó que bajo las condiciones óptimas de pH del agua residual (7.5) y dosis de *Chlorella sp.* (30%) en CCM, se logró remover el cadmio en un 86.19% y la DQO en un 63.26%.
5. La celda CCM Blanco mostró el más alto rendimiento en la generación de voltaje (1118.5 mV) y corriente (1.78 mA) a lo largo del período de operación de la primera etapa, pero sin tener efecto en la remoción de Cd. Mientras que las celdas inoculadas con *Chlorella sp.* lograron valores máximos de voltaje de 918 mV y 2.15 mA de corriente en la primera etapa operativa, y 894 mV y 4.61 mA en la segunda etapa.

## VII. RECOMENDACIONES

Aplicar la dosis óptima de *Chlorella sp.* (30%) en CCM con mayores volúmenes de trabajo de agua residual (2.5 – 5 L) y realizar monitoreos diarios o a intervalos de 3 días de la concentración del cadmio en un periodo de 25 - 30 días.

Evaluar tratamientos de remoción de metales pesados en CCM inoculadas con *Chlorella sp.* a diferentes pH iniciales del agua residual de los reportados en esta investigación pero que se encuentren en el rango de 5.5 - 9.5.

Analizar el efecto de la aplicación de *Chlorella sp.* en la remoción de contaminantes de aguas residuales de diversas fuentes, evaluando más parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nutrientes, hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados, pesticidas, compuestos fenólicos y compuestos orgánicos volátiles, y también en la eliminación de parámetros microbiológicos y parasitológicos tales como coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli*.

Emplear electrodos de carbón activado en CCM con biocátodos. Estos electrodos han demostrado ser compatibles con los microorganismos, permitiendo la adherencia uniforme de la biopelícula bacteriana sobre la superficie y presentando una buena conductividad para la generación de energía eléctrica.

Monitorear más parámetros electroquímicos en la generación de electricidad en las CCM, como densidad de potencia, densidad de corriente, resistencia interna, potencia, eficiencia Coulómbica y polarización.

Realizar el análisis molecular de los microorganismos identificados en el ánodo de las celdas (*Pseudomonas putida* y *Klebsiella oxytoca*), para comprender su estructura, diversidad, evolución, interacciones y funciones biológicas en los procesos de generación de electricidad por medio de la secuenciación del material genético (ADN o ARN).

Realizar el análisis SEM y EDS de los electrodos de carbón activado al inicio y al final de los tratamientos experimentales, para conocer la variación de la composición de los elementos presentes.

## REFERENCIAS

- ABOURACHED, Carole; CATAL, Tunc & LIU, Hong. Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production. *Water Research*, Volume 51, 2014, pages 228-233, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.062>. ISSN 0043-1354.
- ABUBACKAR, Haris et al. Yeast industry wastewater treatment with microbial fuel cells: Effect of electrode materials and reactor configurations. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], pages 12424-12432, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.277>. ISSN 0360-3199.
- AGÜERO-QUIÑONES, Rickelmi, et al. Electricity generation and wastewater treatment using microbial fuel cells with graphite and aluminum electrodes. 2nd LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development – LEIRD, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.95>
- ANTOLINI, Ermete. Photoelectrocatalytic fuel cells and photoelectrode microbial fuel cells for wastewater treatment and power generation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], Volume 7, 2019, 103241. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103241>. ISSN 2213-3437.
- ARUN, S. et al. Algae based microbial fuel cells for wastewater treatment and recovery of value-added products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], Volume 132, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110041>. ISSN 1364-0321.
- BIRD, Hannah et al. Pilot-scale Microbial Fuel Cells (CCM): A meta-analysis study to inform full-scale design principles for optimum wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production* [en línea], Volume 346, 2022, 131227. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131227>. ISSN 0959-6526.
- BO, Yahui et al. Mixotrophic culture of bait microalgae for biomass and nutrients accumulation and their synergistic carbon metabolism. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 367, 2023, 128301. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128301>. ISSN 0960-8524.

- BOLOGNESI, Silvia et al. Tubular photo-MFC reactors as wastewater polishing treatment step with simultaneous electricity production. *Bioresource Technology Reports* [en línea], Volume 18, 2022, 101059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101059>. ISSN 2589-014X.
- CHERAGHIPOOR, Marzieh et al. Enhancing the efficiency of ceramic native soil membrane using Zircon in a continuous microbial fuel cell for wastewater treatment and sustainable energy. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], Volume 10, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108255>. ISSN 2213-3437.
- CHIN, Min et al. Life cycle assessment of bioelectrochemical and integrated microbial fuel cell systems for sustainable wastewater treatment and resource recovery. *Journal of Environmental Management* [en línea], Volume 320, 2022, 115778, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115778>. ISSN 0301-4797.
- CHIRANJEEVI, P. & PATIL, Sunil. 10 - Microbial fuel cell coupled with microalgae cultivation for wastewater treatment and energy recovery. Butterworth-Heinemann, 2020, pages 213-227, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00010-2>. ISBN 9780128174937.
- CHRISTWARDANA, Marcelinus et al. Performance evaluation of yeastassisted microalgal microbial fuel cells on bioremediation of cafeteria wastewater for electricity generation and microalgae biomass production. *Biomass and Bioenergy* [en línea], Volume 139, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105617>. ISSN 0961-9534.
- COMMAULT, Audrey et al. Electricity and biomass production in a bacteria-Chlorella based microbial fuel cell treating wastewater. *Journal of Power Sources*, Volume 356, 2017, pages 299-309, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.097>. ISSN 0378-7753.
- CONCEPCIÓN-TOLEDO, D., et al. Metodología de la investigación: Origen y construcción de una tesis doctoral. *Revista Científica de la UCSA* [en línea], Volumen 6 Número 1, p. 76–87, 2019, Disponible en: <https://revista.ucsa-ct.edu.py/ojs/index.php/ucsa/article/view/2>

- CORA, Braulio et al. Generating of electricity and municipal wastewater treatment using microbial fuel cells (MFC) in the city of Huancavelica. [en línea] volumen 1, 2020, doi: <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-018> ISSN 5410-0571.
- DE CASTRO, Cláudio et al. Environmental application of a cost-effective smartphone-based method for COD analysis: Applicability in the electrochemical treatment of real wastewater. *Science of The Total Environment* [en línea], Volume 855, 2023, 158816, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158816>. ISSN 0048-9697.
- DE LA CRUZ – NORIEGA, Magaly et al. Potential Use of Mango Waste and Microalgae *Spirulina* sp. for Bioelectricity Generation. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management* [en línea], Volume 78 No. 3, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.5755/j01.arem.78.3.31117>. ISSN: 2029-2139.
- De la Cruz-Noriega et al. Potential Use of Mango Waste and Microalgae *Spirulina* sp. for Bioelectricity Generation. *Environmental Research Engineering and Management*, vol. 78 núm. 3 (2022), doi: <https://doi.org/10.5755/j01.arem.78.3.31117> ISSN en línea: 2029-2139
- DENG, Zhikang et al. Microalgae fuel cells enhanced biodegradation of imidacloprid by *Chlorella* sp. *Biochemical Engineering Journal*, Volume 179, 2022, 108327, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108327>. ISSN 1369-703X.
- DING, Meng-wen et al. Food availability on the shore: Linking epilithic and planktonic microalgae to the food ingested by two intertidal gastropods. *Marine Environmental Research* [en línea], Volume 136, 2018, p. 71-77. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.02.005>. ISSN 0141-1136.
- DO, M.H., et al. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Science of The Total Environment* [en línea], Volume 639, 2018, p. 910-920. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>. ISSN 0048-9697.
- ELSHOBARY, Mostafa et al. Recent insights into microalgae-assisted microbial fuel cells for generating sustainable bioelectricity. *International*

- Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 4, 2021, pages 3135-3159, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.251>. ISSN 0360-3199.
- FADZLI, Fatin Syahirah et al. Electricity generation and heavy metal remediation by utilizing yam (*Dioscorea alata*) waste in benthic microbial fuel cells (BCCM). *Biochemical Engineering Journal* [en línea], Volume 172, 2021, 108067. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108067>. ISSN 1369-703X.
  - FLORES, Vilma et al. Remoción de contaminantes orgánicos de aguas residuales industriales por electrocoagulación, con adición de peróxido de hidrógeno, en un reactor tubular. Tesis para optar el Grado de Maestra en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional del Centro del Química, 2018. Disponible en: [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5165/T010\\_20082952\\_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5165/T010_20082952_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
  - FONSECA, Larissa & PANIMBOSA, Melanie. Evaluación de un electrocoagulador para la disminución de contaminantes en aguas residuales de la industria láctea, en el periodo abril-agosto 2021. Universidad técnica de Cotopaxi, Ecuador, 2021. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7835>.
  - GADKARI, Siddharth et al. Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation. *Chemical Engineering Journal* [en línea], Volume 388, 2020, 124176. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124176>. ISSN 1385-8947.
  - GAJDA, Iwona, et al. A new method for urine electrofiltration and long term power enhancement using surface modified anodes with activated carbon in ceramic microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, Volume 353, 2020, 136388, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136388>. ISSN 0013-4686.
  - GARCÍA-GALÁN, Jesús et al. Removal and environmental risk assessment of contaminants of emerging concern from irrigation waters in a semi-closed microalgae photobioreactor. *Environmental Research* [en línea], Volume

- 194, 2021, 110278. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110278>. ISSN 0013-9351.
- GOMES, Alessandra et al. Frame Rhythm: A new cost-effective approach for semi-automatic microalgal imaging and enumeration. *Algal Research* [en línea], Volume 64, 2022, 102659. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102659>. ISSN 2211-9264.
  - GONG, Yuhao et al. *Chlorella sp.* Mg shows special trophic transitions and biomass production. *Bioresource Technology Reports* [en línea], Volume 16, 2021, 100854. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100854>. ISSN 2589-014X.
  - GUDE, Veera. Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview, *Journal of Cleaner Production* [en línea]. Volume 122, 2016, p. 287-307. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.022>. ISSN 0959-6526.
  - GUL, Hajera et al. Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting. *Chemosphere* [en línea], Volume 281, 2021, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130828>. ISSN 0045-6535.
  - GUPTA, Supriya et al. An algal assisted constructed wetland-microbial fuel cell integrated with sand filter for efficient wastewater treatment and electricity production. *Chemosphere* [en línea], Volume 263, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128132>. ISSN 0045-6535.
  - HAMED, Seham et al. A novel integrated system for heavy metals removal and biodiesel production via green microalgae: A techno-economic feasibility assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 10, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108804>. ISSN 2213-3437.
  - HARIS, Noorazilah et al. Effect of different salinity on the growth performance and proximate composition of isolated indigenous microalgae species. *Aquaculture Reports* [en línea], Volume 22, 2022, 100925. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100925>. ISSN 2352-5134.
  - HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. & MENDOZA, C. Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *Editorial Mc Graw Hill Education* [en línea], 2018, p. 714. Disponible en:

- <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/handle/54000/1292>. ISBN: 978-1-4562-6096-5.
- HOU, Qingjie et al. Mutual facilitations of food waste treatment, microbial fuel cell bioelectricity generation and *Chlorella vulgaris* lipid production. *Bioresource Technology*, Volume 203, 2016, pages 50-55, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.049>. ISSN 0960-8524.
  - HUARACHI-OLIVERA, Ronald et al. Bioelectrogenesis with microbial fuel cells (MFCs) using the microalga *Chlorella vulgaris* and bacterial communities. *Electronic Journal of Biotechnology*, Volume 31, 2018, pages 34-43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.10.013>. ISSN 0717-3458.
  - JAAFARI, Jalil & YAGHMAEIAN, Kamyar. Optimization of heavy metal biosorption onto freshwater algae (*Chlorella coloniales*) using response surface methodology (RSM). *Chemosphere*, Volume 217, 2019, Pages 447-455, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.205>. ISSN 0045-6535.
  - JAROO, Suhad et al. Photosynthetic Microbial Desalination Cell to Treat Oily Wastewater Using Microalgae *Chlorella Vulgaris*. *Civil Engineering Journal* [en línea], Volume, 2019, p. 2686-2699. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2019-03091441>
  - KHANDAKER, Shahjalal et al. Sustainable approach for wastewater treatment using microbial fuel cells and green energy generation – A comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids* [en línea], Volume 344, 2021, 117795. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117795>. ISSN 0167-7322.
  - KOUAM, Tchummegne & MANDAL, Bishnupada. Microbial fuel cell design, application and performance: A review. *Materials Today: Proceedings* [en línea], 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.131>. ISSN 2214-7853.
  - KUMAR, Krishna et al. Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], volumen 38, p.101549, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549> ISSN 2214-7144.

- LIU, Dongyang et al. Pollutant removal and toxic response mechanisms of freshwater microalgae *Chlorella sorokiniana* under exposure of tetrabromobisphenol A and cadmium. *Chemical Engineering Journal*, Volume 461, 2023, 142065, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142065>. ISSN 1385-8947.
- LIU, Fei-fei, LU, Tong & ZHANG, Yu-xue. Performance assessment of constructed wetland-microbial fuel cell for treatment of mariculture wastewater containing heavy metals. *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 168, 2022, pages 633-641, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.026>. ISSN 0957-5820.
- LIU, Ranbin et al. Capabilities and mechanisms of microalgae on removing micropollutants from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management* [en línea], Volume 285, 2021, 112149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112149>. ISSN 0301-4797.
- LÓPEZ, Francisco et al. Removal efficiency for emerging contaminants in a WWTP from Madrid (Spain) after secondary and tertiary treatment and environmental impact on the Manzanares River. *Science of The Total Environment*, Volume 812, 2022, 152567, ISSN 0048-9697, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152567>
- LUCAS, Pedro. Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio in vitro utilizando la microalga *Chlorella sp.* y su potencial para la biorremediación de sitios naturales contaminados. Disponible en: <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/8068/1/UDLA-EC-TIB-2017-38.pdf>
- LUTTERBECK, Carlos, et al. Microbial fuel cells and constructed wetlands as a sustainable alternative for the treatment of hospital laundry wastewaters: Assessment of load parameters and genotoxicity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 10, Issue 3, 2022, 108105, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108105>. ISSN 2213-3437.
- MISHRA, Arti et al. Omics approaches for microalgal applications: Prospects and challenges. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 291, 2019, 121890. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121890>. ISSN 0960-8524.

- MOHAMED, Abdelrhman et al. Large-scale switchable potentiostatically controlled/microbial fuel cell bioelectrochemical wastewater treatment system. *Bioelectrochemistry* [en línea], Volume 138, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107724>. ISSN 1567-5394.
- MOHYUDIN, Sidra et al. Microbial fuel cells a state-of-the-art technology for wastewater treatment and bioelectricity generation. *Environmental Research* [en línea], Volume 204, Part D, 2022, 112387. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112387>. ISSN 0013-9351.
- MUÑOZ-CUPA, Carlos et al. An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. *Science of The Total Environment* [en línea], Volume 754, 2021, 142429. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142429>. ISSN 0048-9697.
- NAWAZ, Ali et al. Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], Volume 161, 2022, p. 357-373. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039> . ISSN 0957-5820.
- NAYAK, Jagdeep & GHOSH, Uttam. Post treatment of microalgae treated pharmaceutical wastewater in photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) and biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, Volume 131, 2019, 105415, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105415>. ISSN 0961-9534.
- NOOKWAM, Kidakarn et al. Microbial fuel cells with Photosynthetic-Cathodic chamber in vertical cascade for integrated Bioelectricity, biodiesel feedstock production and wastewater treatment. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 346, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126559>. ISSN 0960-8524.
- OBILEKE, KeChrist et al. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications* [en línea], Volume 125, 2021, 107003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>. ISSN 1388-2481.
- OMENESA, Mustapha et al. Exploring the effectiveness of microbial fuel cell for the degradation of organic pollutants coupled with bio-energy generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 52, Part B,

- 2022, 102183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102183>. ISSN 2213-1388.
- PEI-FANG, Tee, et al. Effects of temperature on wastewater treatment in an affordable microbial fuel cell-adsorption hybrid system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 5, Issue 1, 2017, pages 178-188, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.040>. ISSN 2213-3437.
  - POLI, Federico, SANTORO, Carlo & SOAVI, Francesca. Improving microbial fuel cells power output using internal and external optimized, tailored and totally green supercapacitor. *Journal of Power Sources*, Volume 564, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232780>. ISSN 0378-7753.
  - QUIJANO, Antori et al. Removal of cadmium and lead from a mining effluent in Ticapampa-Recuay, Ancash using *Serratia marcescens*M8a-2T dry biomass. *Anales Científicos* [en línea], Volume 82, 2021, 336-345. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v82i2.1788>. ISSN 2519-7398.
  - RAHEEM, Abdul et al. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. *Journal of Cleaner Production* [en línea], Volume 181, 2018, p. 42-59. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>. ISSN 0959-6526.
  - RAJU, C., et al. Studies on development of microbial fuel cell for waste water treatment using bakers yeast. *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, Part 1, 2021, pages 683-688, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.611>. ISSN 2214-7853.
  - RAMYA, M.P. & KUMAR, Senthil. A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. *Chemosphere* [en línea], Volume 288, Part 2, 2022, 132512. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132512>. ISSN 0045-6535.
  - RANGABHASHIYAM Selvasembian, et al. Recent progress in microbial fuel cells for industrial effluent treatment and energy generation: Fundamentals to scale-up application and challenges. *Bioresour. Technol.* [en línea], Volume 346, 2022, 126462. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126462>. ISSN 0960-8524.

- RIBEIRO, Vanessa et al. The use of microalgae-microbial fuel cells in wastewater bioremediation and bioelectricity generation. *Journal of Water Process Engineering*, Volume 48, 2022, 102882, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102882>. ISSN 2214-7144.
- ROJAS-FLORES, Segundo, et al. Uso de Residuos de Kiwi como Combustible en MFC y su Potencial de Uso como Energía Renovable. *Fermentación* [en línea]. 8 de mayo de 2023. vol. 9, núm. 5, pág. 446, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation9050446>
- Romadhoni, Alvin et al. Mechanism adsorption–reduction into the incorporation of microbial fuel cell–metal organic framework and overview of hydrodynamics effects for enhanced reduction of Cr (VI). *Journal of Water Process Engineering*, Volume 49, 2022, 103095, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103095>. ISSN 2214-7144.
- RUEDA, Estel et al. Polyhydroxybutyrate and glycogen production in photobioreactors inoculated with wastewater borne cyanobacteria monocultures. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 295, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122233>. ISSN 0960-8524.
- RUIZ, Baldeon et al. Determinación de la eficiencia de celdas combustibles microbianas por uso de lodos residuales en reemplazo de energías no renovables. proyecto de servicios ambientales. Tesis doctoral, Universidad agraria del ecuador, 2021. Disponible en: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RUIZ%20BALDEON%20GABRIELA%20ORENATTA.pdf>
- SALLAM, E.R., et al. Sustainable electricity production from seawater using *Spirulina platensis* microbial fuel cell catalyzed by silver nanoparticles-activated carbon composite prepared by a new modified photolysis method. *Biomass and Bioenergy*, Volume 148, 2021, 106038, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106038>. ISSN 0961-9534.
- SARAN, Christina et al. Microbial fuel cell: A green eco-friendly agent for tannery wastewater treatment and simultaneous bioelectricity/power generation. *Chemosphere* [en línea], Volume 312, Part 1, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137072>. ISSN 0045-6535.

- SARAN, Christina et al. Microbial fuel cell: A green eco-friendly agent for tannery wastewater treatment and simultaneous bioelectricity/power generation. *Chemosphere*, Volume 312, Part 1, 2023, 137072, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137072>. ISSN 0045-6535.
- SHARAFAT Iqra, et al. Trivalent iron shaped the microbial community structure to enhance the electrochemical performance of microbial fuel cells inoculated with soil and sediment, *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], Volume 10, Issue 3, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107790>. ISSN 2213-3437.
- SHARIF, Hafiz, et al. Recent innovations for scaling up microbial fuel cell systems: Significance of physicochemical factors for electrodes and membranes materials. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 129, 2021, Pages 207-226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.09.001>. ISSN 1876-1070.
- SHARMA, Monika et al. Microalgae-assisted microbial fuel cells for electricity generation coupled with wastewater treatment: Biotechnological perspective. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], Volume 49, 2022, 102966. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102966>. ISSN 2214-7144.
- SHIRKOSH, M., et al. Boosting microfluidic microbial fuel cells performance via investigating electron transfer mechanisms, metal-based electrodes, and magnetic field effect. *Nature* [en línea], 2022, Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11472-6>.
- SIKKANDHAR, Raja, et al. Exploring the concurrent use of microalgae *Coelastrella* sp. for electricity generation and dairy wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, Volume 17, 2022, 100889, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100889>. ISSN 2589-014X.
- SILVEIRA, Gustavo et al. Development, characterization and application of a low-cost single chamber microbial fuel cell based on hydraulic couplers. *Energy* [en línea], Volume 208, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118395>. ISSN 0360-5442.
- SILVEIRA, Gustavo; SIDNEY DE AQUINO, Neto & SCHNEEDORF, José. Development, characterization and application of a low-cost single chamber

- microbial fuel cell based on hydraulic couplers. *Energy*, Volume 208, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118395>. ISSN 0360-5442.
- SINGH, Aradhana & KAUSHIK, Anubha. Removal of Cd and Ni with enhanced energy generation using biocathode microbial fuel cell: Insights from molecular characterization of biofilm communities. *Journal of Cleaner Production* [en línea], Volume 315, 2021, 127940. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127940>. ISSN 0959-6526.
  - SINGH, Aradhana & KAUSHIK, Anubha. Removal of Cd and Ni with enhanced energy generation using biocathode microbial fuel cell: Insights from molecular characterization of biofilm communities. *Journal of Cleaner Production*, Volume 315, 2021, 127940, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127940>. ISSN 0959-6526.
  - SLATE, Anthony J., et al. Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 101, 2019, Pages 60-81, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044>. ISSN 1364-0321
  - SONG, Xinshan et al. *Chlorella vulgaris* on the cathode promoted the performance of sediment microbial fuel cells for electrogenesis and pollutant removal. *Science of The Total Environment*, Volume 728, 2020, 138011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138011>. ISSN 0048-9697.
  - SORGATO, Ana Carla et al. Microbial fuel cell: Interplay of energy production, wastewater treatment, toxicity assessment with hydraulic retention time. *Environmental Research*, Volume 231, Part 2, 2023, 116159, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116159>. ISSN 0013-9351.
  - SURESH, K. et al. Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 113, 2015, pages 329-352, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>. ISSN 0147-6513.
  - VALE, Francisca et al. Impact of parabens on microalgae bioremediation of wastewaters: A mechanistic study. *Chemical Engineering Journal* [en línea], Volume 442, Part 2, 2022, 136374. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136374>. ISSN 1385-8947.

- VARANASI, Jhansi et al. Improvement of bioelectricity generation and microalgal productivity with concomitant wastewater treatment in flat-plate microbial carbon capture cell. *Fuel* [en línea], Volume 263, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116696>. ISSN 0016-2361.
- VAZ, Antonio et al. Impact of heavy metals in the microalga *Chlorella sorokiniana* and assessment of its potential use in cadmium bioremediation [en línea], volumen 239, p. 105941, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105941> ISSN 0166-445.
- VERMA, Priyanka et al. Microbial Fuel Cell – A Sustainable Approach for Simultaneous Wastewater Treatment and Energy Recovery. *Journal of Water Process Engineering* [en línea], Volume 40, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101768>. ISSN 2214-7144.
- WANG, Bo et al. Cell damage repair mechanism in a desert green algae *Chlorella* sp. against UV-B radiation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea], Volume 242, 2022, 113916. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113916>. ISSN 0147-6513.
- WANG, Huimin et al. The efficient treatment of breeding wastewater by an electroactive microbial community in microbial fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], Volume 10, Issue 2, 2022, 107187. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107187>. ISSN 2213-3437.
- WANG, Se et al. Assessing the potential of *Chlorella* sp. for treatment and resource utilization of brewery wastewater coupled with bioproduct production. *Journal of Cleaner Production* [en línea], Volume 367, 2022, 132939. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132939>. ISSN 0959-6526.
- YANG, Zhigang et al. Bioelectrochemical process for simultaneous removal of copper, ammonium and organic matter using an algae-assisted triple-chamber microbial fuel cell. *Science of The Total Environment*, Volume 798, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149327>. ISSN 0048-9697.
- YE, Yuanyao et al. Microbial fuel cell for nutrient recovery and electricity generation from municipal wastewater under different ammonium

- concentrations. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 292, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121992>. ISSN 0960-8524.
- YU, Jaecheul et al. Microbial fuel cells: Devices for real wastewater treatment, rather than electricity production. *Science of The Total Environment* [en línea], Volume 775, 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145904>. ISSN 0048-9697.
  - ZHANG, Yu et al. Algae cathode microbial fuel cells for cadmium removal with simultaneous electricity production using nickel foam/graphene electrode. *Biochemical Engineering Journal*, Volume 138, 2018, pages 179-187, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.07.021>. ISSN 1369-703X.
  - ZHAO, Kai et al. Dielectrophoresis-assisted removal of Cd and Cu heavy metal ions by using *Chlorella microalgae*. *Environmental Pollution*, Volume 334, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122110>. ISSN 0269-7491
  - ZHENG, Hongjing et al. Biomass production of carbohydrate-rich filamentous microalgae coupled with treatment and nutrients recovery from acrylonitrile butadiene styrene-based wastewater: Synergistic enhancement with low carbon dioxide supply strategy. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 349, 2022, 126829. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126829>. ISSN 0960-8524.
  - ZHOU, Jin-Long et al. Mechanisms and application of microalgae on removing emerging contaminants from wastewater: A review. *Bioresource Technology* [en línea], Volume 364, 2022, 128049. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128049>. ISSN 0960-8524.
  - ZHOU, Ying et al. Simultaneous electricity production and antibiotics removal by microbial fuel cells. *Journal of Environmental Management* [en línea], Volume 217, 2018, p. 565-572. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.013>. ISSN 0301-4797.

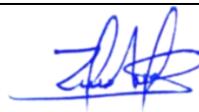
## ANEXOS

**Tabla 14.** Matriz de operacionalización de variables.

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Biomasa de la microalga <i>Chlorella sp.</i> (Independiente)	La biomasa de <i>Chlorella sp.</i> es un sustrato utilizado en la obtención de energía y bioproductos, así como en tratamientos por biorremediación utilizando dispositivos adecuados como las CCM (Wang et al, 2022, p.5).	Se cultivó la microalga <i>Chlorella sp.</i> , y se evaluó su efecto en la remoción de contaminantes del agua residual a diferentes dosis, pH y tiempo de aplicación en CCM.	Dosis de biomasa (%)	10% 20% 30%	Razón
			pH	6.5 7.0 7.5	Razón
			Tiempo	Días	Intervalo
Depuración del agua residual municipal (Dependiente)	Es un tratamiento por el que pasa el agua residual para eliminar los contaminantes presentes en ella y mejorar sus parámetros fisicoquímicos, inorgánicos, orgánicos y microbiológicos hasta una calidad óptima (Flores et al., 2018, p.46).	Se realizaron mediciones iniciales, finales y en intervalos de tiempo (cada 3 días) para determinar la concentración de los contaminantes del agua residual, y se calculó el porcentaje de remoción. Asimismo, se monitorearon los parámetros fisicoquímicos.	Remoción de contaminantes del agua residual	Cadmio (mg/L)	Razón
				Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	
				Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	
				Turbidez (NTU)	
			Monitoreo de parámetros fisicoquímicos	pH	Razón
				Oxígeno disuelto (mg/L)	
Conductividad eléctrica (µS/cm)					
Generación de energía eléctrica (Dependiente)	Se produce cuando hay un flujo de electrones entre dos puntos (ánodo y cátodo) en los que existe una diferencia de potencial (Ruiz, 2021, p.41).	Se determinó por medio del monitoreo de parámetros físicos empleando un multímetro digital. Asimismo, se realizaron análisis para conocer las características de los electrodos de carbón activado, y para identificar la comunidad microbiana presente en la superficie del ánodo.	Monitoreo de parámetros electroquímicos	Voltaje (mV)	Razón
				Corriente eléctrica (mA)	
			Identificación de microorganismos	Identificación bioquímica de microorganismos del ánodo	Nominal
				Características de los electrodos de carbón activado	Microscopía electrónica de barrido (SEM)
			Espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS)		
			Espectroscopía por transformada de Fourier (FTIR)		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 15. Ficha de muestreo de aguas residuales municipales.**

Ficha 1. Muestreo de aguas residuales municipales						
Datos generales:						
Lugar de muestreo: Laguna de Estabilización de Aguas Residuales Municipales						
Localidad: Urpay			Distrito: Urpay			
Provincia: Pataz			Departamento: La Libertad			
Datos de las muestras:						
Tipo de muestra: Agua Residual Municipal			Tipo de muestreo: Compuesto			
Responsables del muestreo:						
Rickelmi Alessander Agüero Quiñones			Zairi Marilú Ávila Sánchez			
Punto de Muestreo	Volumen (litros)	Coordenadas UTM		Fecha	Hora	Observaciones
		Norte	Este			
P1	2.5	9076034.92	236715.59	28/02/2023	1:10 pm	-
P2	2.5	9076040.12	236718.38	28/02/2023	1:20 pm	-
P3	2.5	9076045.28	237714.72	28/02/2023	1:30 pm	-
P4	2.5	9076043.86	230708.00	28/02/2023	1:40 pm	-
P5	2.5	9076036.74	236707.68	28/02/2023	1:50 pm	-
Firmas de los responsables del muestreo:						
						

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16. Ficha de características iniciales del agua residual municipal.**

Ficha 2. Características iniciales del agua residual municipal	
Procedencia de la muestra: Urpay, Pataz, La Libertad	
Fecha de análisis: 01/03/2023	
Parámetros	Valores
pH	5.9 ± 0.01
Temperatura (°C)	23.6 ± 0.01
Conductividad eléctrica (µS/cm)	2450.48 ± 0.1
Potencial de oxidación y reducción (mV)	72 ± 1
Turbidez (NTU)	569.11 ± 0.01
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.89 ± 0.01
Sólidos totales disueltos (mg/L)	1849 ± 1
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	1314.73 ± 0.01
Cadmio (mg/L)	0.236 ± 0.01

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 17.** Ficha de medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de *Chlorella sp.*

<b>Ficha 3. Medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de <i>Chlorella sp.</i></b>	
Microalga: <i>Chlorella sp.</i>	Biomasa (ml): 1500 ml
Medio de cultivo:	
Caldo de residuos de pescado (ml):	1500
Urea (g):	2.55
Cloruro de potasio (g):	0.255
<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
pH	7.86
Temperatura (°C)	23.6°C
Absorbancia (UA)	2.9180
Densidad celular (cél/ml)	2347500

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 18.** Ficha de remoción de cadmio del agua residual para la primera etapa operativa.

<b>Ficha 4. Remoción de Cd del agua residual en la primera etapa operativa.</b>			
<b>Código de celda</b>	<b>Cadmio inicial (mg/L)</b>	<b>Cadmio final (mg/L)</b>	<b>Porcentaje de remoción (%)</b>
CCMBA	0.236	0.234	0.85
CCMBB	0.236	0.235	0.42
CCM1A	0.236	0.154	34.75
CCM1B	0.236	0.151	36.02
CCM2A	0.236	0.114	51.69
CCM2B	0.236	0.116	50.85
CCM3A	0.236	0.097	58.90
CCM3B	0.236	0.093	60.59
CCM4A	0.236	0.127	46.19
CCM4B	0.236	0.089	62.29
CCM5A	0.236	0.081	65.68
CCM5B	0.236	0.082	65.25
CCM6A	0.236	0.074	68.64
CCM6B	0.236	0.077	67.37
CCM7A	0.236	0.015	93.64
CCM7B	0.236	0.012	94.92
CCM8A	0.236	0.009	96.19
CCM8B	0.236	0.008	96.61
CCM9A	0.236	0.006	97.46
CCM9B	0.236	0.005	97.88

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19. Ficha de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa.**

Ficha 5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa.																										
Código de celda	Parámetros fisicoquímicos	Días de monitoreo																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CCMBA	pH	6.56	6.01	5.56	5.74	6.14	6.45	6.76	6.62	6.99	7.14	7.23	7.31	6.63	6.71	6.76	7.17	6.59	6.89	7.34	7.37	7.43	7.27	7.37	7.61	7.59
	Turbidez (NTU)	59	63	49.21	48.45	48	41.84	41.94	37.19	34.22	30.27	33.08	39.23	42.48	41.5	37.84	35.75	32.11	36.94	36.58	35.47	34.77	36.42	33.4	32.85	31.92
CCM1A	pH	7.38	7.47	7.21	7.12	7.42	7.56	7.58	7.52	7.74	7.42	7.47	7.79	7.40	7.47	7.40	7.79	7.47	7.48	7.80	7.83	7.83	7.82	7.93	7.48	7.20
	Turbidez (NTU)	414	294	262	227	187	106	112	105	86	92	92	82	72	70	68	62	52	38.87	40.67	37.57	29.41	16.28	15.92	15.22	11.5
CCM2A	pH	7.43	7.37	7.25	7.25	6.39	6.69	7.53	7.59	7.90	8.02	7.92	8.06	7.61	7.84	7.68	7.85	7.96	7.94	8.07	8.07	8.17	8.07	8.21	8.25	8.24
	Turbidez (NTU)	666	412	366	188	177	163	128	107	93	85	82	88	73	67	45	49	49.77	43.88	46.25	42.11	32.2	18.86	17.98	18.46	11.79
CCM3A	pH	7.46	6.94	7.16	7.03	6.88	7.03	7.60	7.74	7.93	8.08	7.99	8.08	7.66	8.00	8.01	7.96	8.00	8.03	8.12	8.14	8.17	80.6	8.18	8.200	8.19
	Turbidez (NTU)	404	223	117	125	109	77	66	76	54	50	47	43.46	43.21	33.13	37.06	36	32.17	25.31	25.2	24.39	23.72	21.24	24.31	25.49	24.94
CCM4A	pH	7.43	7.46	7.27	6.91	7.36	7.84	7.55	7.95	8.04	8.01	7.98	7.72	7.99	8.05	7.98	7.93	7.99	7.91	7.91	8.02	8.04	7.97	8.12	8.19	8.17
	Turbidez (NTU)	570	315	298	238	225	212	204.7	186	110	109	94	103	83	85	61	73	38.6	46.33	38.6	36.17	34.93	27.44	21.09	19.54	8.57
CCM5A	pH	7.60	7.34	7.38	7.04	7.40	7.39	7.75	7.34	7.90	7.90	7.95	7.95	7.67	8.01	8.05	7.85	7.91	7.84	8.01	7.95	8.02	7.92	8.00	8.20	8.12
	Turbidez (NTU)	468	239	213	208.5	202.3	194	188	171	166	162	159	126	123	123	116	109	98	86	77	75	69	71	62	64	38.5
CCM6A	pH	7.58	7.71	7.60	7.33	7.60	7.63	7.85	7.41	7.99	8.09	8.08	8.02	7.65	7.89	8.00	7.90	7.95	7.90	8.04	8.02	8.16	8.12	8.10	8.23	8.22
	Turbidez (NTU)	323	254	226	143	134	118	117	112	92	87	84	74	74	66	52	48	40.91	28.56	27.59	27.47	18.8	11.9	13.08	11.91	11.64
CCM7A	pH	7.32	7.39	7.53	7.24	7.65	7.72	7.97	7.43	8.00	7.99	8.05	7.91	7.11	7.90	8.11	8.01	7.97	8.15	7.97	7.74	7.74	7.79	8.06	8.24	8.19
	Turbidez (NTU)	7.19	378	358	210	188	174	149	122	108	105	89	86	83	89	65	64	53	26.2	39.52	38.99	26.86	18.84	17.93	11	2.5
CCM8A	pH	7.32	7.36	7.40	7.30	7.69	7.80	8.03	7.79	8.01	8.03	8.10	8.03	7.89	8.10	8.14	8.09	7.99	8.12	8.00	8.93	8.19	8.05	8.20	8.27	8.17
	Turbidez (NTU)	716	461	317	292	288	246	213	185	118	109	101	97	91	73	76	75	57	43.07	42.36	37.87	30.51	25.66	22.61	22.18	11.14
CCM9A	pH	7.71	7.59	7.46	7.33	7.59	7.73	7.96	7.83	7.94	7.97	8.10	8.09	7.97	8.14	8.17	8.13	8.05	8.15	8.21	8.20	8.26	8.16	8.27	8.33	8.26
	Turbidez (NTU)	694	547	353	274	203	171	117	115	112	110	99	94	94	91	87	83	76	60	66	62	59	45	37	34.45	13.06
CCMBB	pH	6.19	5.76	5.03	5.07	5.22	5.37	5.23	5.28	5.67	6.01	5.91	5.82	6.18	6.49	6.55	6.72	6.77	7.00	6.98	6.99	7.80	7.31	8.32	7.53	7.72
	Turbidez (NTU)	55	52.8	52.33	51.71	51.47	50.1	49.48	48.79	48.08	46.96	42.61	43.15	42.85	40.78	39.75	35.8	33.74	36.77	34.41	32.2	31.64	31.26	30.62	31.52	31.03
CCM1B	pH	7.42	7.36	7.00	6.63	6.92	7.11	7.35	7.69	7.50	7.48	8.00	7.98	7.49	7.47	8.07	7.70	7.93	7.74	7.75	7.88	7.99	7.84	8.19	7.66	8.20
	Turbidez (NTU)	641	318	222	214	197	134	94	89	87	73	68	59	69	63	69	67	64	54	54	52	46.38	26.96	32.25	28.08	19.15
CCM2B	pH	7.36	7.43	7.09	6.95	7.20	7.65	7.86	7.56	7.97	7.98	8.08	8.00	7.68	8.03	8.09	8.04	8.04	8.08	8.14	8.16	8.20	8.10	8.25	8.18	8.14
	Turbidez (NTU)	330	312	276	215	201	187	166	134	107	108	95	89	85	81	75	72	62	32.93	24.71	24.24	18.99	17.52	18.07	12.8	11.93
CCM3B	pH	7.30	7.19	7.28	7.00	7.42	7.61	7.82	7.63	7.84	7.90	8.01	7.97	7.79	7.81	7.96	7.89	7.96	8.05	8.07	8.07	8.05	7.83	8.16	7.98	8.07
	Turbidez (NTU)	431	233	198	83	75	68	67	64	62	61	61	59	58	55	50	55.3	51	49.52	49.15	42.49	42.84	42.49	43	43.07	29.2
CCM4B	pH	7.18	7.10	6.78	7.07	7.56	7.75	7.80	7.54	7.98	8.01	8.00	7.81	7.82	8.10	8.11	8.02	7.93	7.96	7.94	7.76	7.95	7.70	7.93	7.98	7.96
	Turbidez (NTU)	333	2.46	225	163	134	115	103	96	96	89	87	86	82	65	58	52	50	51	50	47.09	47.08	44.02	37.07	26.98	21.45

CCM5B	pH	7.50	7.39	7.16	7.11	7.47	7.07	7.01	6.99	7.48	7.63	7.58	7.41	7.72	7.94	8.03	7.99	7.86	7.72	7.64	7.88	7.90	8.00	8.04	7.91	7.85
	Turbidez (NTU)	681	402	377	321	295	245	240	214	213	189	118	108	116	108	105	105	98	90	80	80	80	87	64	46.29	42.7
CCM6B	pH	7.63	7.61	7.37	7.24	7.55	7.62	7.83	7.45	7.81	7.93	7.98	7.52	7.56	7.88	8.17	8.05	7.82	7.88	7.86	7.82	7.96	7.91	8.06	8.10	8.07
	Turbidez (NTU)	425	371	324	214	203	199	192	188	186	179	171	122	119	103	102	96	78	60	55	47.06	40.08	19.52	19.08	19.52	6.72
CCM7B	pH	7.62	7.51	7.25	7.14	7.56	7.67	7.89	7.54	7.87	7.99	8.11	8.02	7.74	8.02	8.08	7.84	7.87	7.97	7.99	7.94	8.03	8.02	8.25	8.23	8.16
	Turbidez (NTU)	684	156	126	114	108	106	103	98	98	92	84	78	68	64	63	57	51	50	48.91	44.92	42.35	35.37	32.8	29.55	12.94
CCM8B	pH	7.66	7.70	7.19	7.04	7.48	7.77	7.97	7.65	7.92	8.06	8.07	8.00	7.72	7.98	8.14	8.04	7.81	7.96	8.06	7.98	8.05	7.74	8.14	8.20	8.13
	Turbidez (NTU)	667	245	195	171	155	130	123	121	115	112	98	88	99	81	78	75	71	59	68	68	62	43.53	35.16	48.31	11.78
CCM9B	pH	7.10	7.51	7.24	7.07	7.47	7.45	8.01	7.63	7.97	8.07	8.09	8.12	8.14	8.54	8.38	8.25	8.07	8.03	8.14	8.02	8.12	7.95	8.17	8.22	8.18
	Turbidez (NTU)	669	222	133	115	109	97	96	92	92	84	77	74	73	67	66.43	63	56	23.28	28.75	23.68	23.53	14.79	11.07	13.52	2.15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Ficha de monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.

Ficha 6. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.																											
Código de celda	Parámetros electroquímicos de las CCM	Tiempo de monitoreo (días)																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
CCMBA	Voltaje (mV)	1122	1118	1068	1124	964	936	964	927	906	910	920	9002	905	905	894	893	891	891	873	871	873	861	865	898	808	
	Corriente (mA)	1.73	1.58	1.35	1.47	1.44	0.79	1.44	0.79	1.37	1.78	1.53	1.42	0.32	1.59	1.22	1.18	1.11	1.58	1.33	1.37	1.33	1.47	1.56	1.38	1.15	
CCM1A	Voltaje (mV)	780	720	797	847	808	820	808	764	762	764	727	717	694	734	728	734	683	621	624	619	624	593	585	627	620	
	Corriente (mA)	1.01	0.75	0.73	1.12	0.91	0.67	0.91	1.50	0.75	0.68	0.63	0.31	0.27	0.43	0.3	0.36	0.22	0.33	0.27	0.27	0.27	0.30	0.31	0.27	0.29	
CCM2A	Voltaje (mV)	752	700	700	827	945	929	945	826	842	837	865	8.06	863	860	878	839	830	716	730	694	730	593	599	597	581	
	Corriente (mA)	1.29	0.97	0.91	0.40	2.36	2.26	1.78	1.82	1.88	1.56	1.68	1.56	1.69	1.78	2.01	2.07	1.78	1.43	0.37	1.27	0.37	0.8	0.85	0.66	0.79	
CCM3A	Voltaje (mV)	773	811	895	950	782	720	792	752	725	839	810	768	738	777	758	789	700	734	705	672	705	613	612	597	611	
	Corriente (mA)	0.78	0.21	1.51	2.00	1.63	1.60	1.61	1.34	1.18	1.34	1.32	1.2	0.84	0.59	0.87	0.78	0.64	0.7	0.46	0.66	0.46	0.58	0.64	0.56	0.63	
CCM4A	Voltaje (mV)	705	666	658	650	641	679	641	752	622	841	685	706	648	645	612	630	624	558	574	597	574	521	574	550	636	
	Corriente (mA)	1.22	0.33	0.44	0.99	1.15	1.43	1.15	1.43	0.69	0.72	0.74	0.78	0.6	0.63	0.47	0.37	0.21	0.39	0.36	0.35	0.36	0.31	0.41	0.33	0.28	
CCM5A	Voltaje (mV)	753	797	732	757	853	866	853	735	823	819	813	776	757	776	815	765	739	707	765	758	765	716	792	690	720	
	Corriente (mA)	1.14	0.67	1.05	1.10	1.45	1.25	1.45	1.91	1.62	1.46	1.48	1.31	1	0.98	0.45	0.82	0.82	0.2	0.45	0.8	0.45	0.76	1.22	1.16	0.78	
	Voltaje (mV)	821	817	733	784	798	787	777	797	767	734	771	722	664	671	716	710	756	725	692	725	692	665	665	662	653	

CCM6A	Corriente (mA)	0.94	0.54	0.33	0.55	0.54	1.38	0.45	0.85	0.49	0.38	0.45	0.64	0.55	0.57	0.5	0.53	0.4	0.54	0.42	0.52	0.37	0.5	0.49	0.53	0.47
CCM7A	Voltaje (mV)	822	853	836	872	836	799	836	751	834	805	791	889	842	821	818	781	774	683	668	639	668	544	575	544	440
	Corriente (mA)	0.23	0.33	0.84	0.96	0.49	0.46	0.42	0.41	0.26	0.28	0.31	0.13	1.02	0.49	0.8	0.72	0.82	1.08	1.03	0.57	0.74	0.54	0.96	0.8	0.41
CCM8A	Voltaje (mV)	864	706	896	877	811	786	811	731	726	711	721	713	693	703	716	704	704	659	672	670	672	602	597	590	562
	Corriente (mA)	1.61	0.91	0.86	1.43	0.85	0.47	0.38	0.41	0.21	0.46	0.48	0.4	0.21	0.46	0.48	0.4	0.45	0.43	0.34	0.3	0.51	0.46	0.46	0.36	0.3
CCM9A	Voltaje (mV)	763	702	760	772	765	758	752	743	736	736	732	693	703	692	716	697	699	702	710	705	710	647	665	626	634
	Corriente (mA)	0.73	0.72	0.91	0.89	0.80	0.81	0.80	0.83	0.66	0.73	0.69	0.65	0.68	0.76	0.53	0.62	0.12	0.69	0.45	0.67	0.45	0.73	0.74	0.7	0.69
CCM9B	Voltaje (mV)	1115	1005	980	982	960	982	960	905	923	914	895	931	920	921	916	922	896	917	896	908	896	895	891	939	858
	Corriente (mA)	0.15	0.21	0.20	0.21	0.30	0.27	0.30	1.78	0.27	1.53	0.27	1.42	0.32	1.59	0.18	1.18	0.28	1.58	0.29	1.37	0.29	1.47	0.39	1.38	0.42
CCM1B	Voltaje (mV)	805	710	902	908	867	859	867	801	788	794	744	860	796	785	790	812	785	781	752	771	752	786	793	785	785
	Corriente (mA)	0.90	0.40	1.13	1.06	0.84	0.85	0.58	0.84	0.73	0.61	1.69	0.62	2.01	0.58	1.95	0.64	1.64	0.61	0.37	0.25	0.37	0.57	0.85	0.49	0.79
CCM2B	Voltaje (mV)	810	833	907	927	877	856	861	678	676	661	630	661	598	606	619	598	571	533	505	502	505	513	490	496	460
	Corriente (mA)	0.16	0.72	0.31	0.46	0.29	0.24	0.30	0.33	0.35	0.37	0.35	0.37	0.39	0.41	0.26	0.26	0.40	0.45	0.37	0.38	0.37	0.36	0.30	0.36	0.29
CCM3B	Voltaje (mV)	723	822	864	886	830	826	818	769	696	633	741	622	730	727	684	746	746	781	624	669	624	657	563	650	533
	Corriente (mA)	0.69	0.81	2.24	2.30	1.29	1.20	1.29	1.20	0.88	0.85	0.92	1	0.92	1.23	0.36	1.11	0.92	1.14	1.08	0.94	1.08	0.65	0.73	0.91	0.69
CCM4B	Voltaje (mV)	1002	823	948	916	864	784	740	830	870	892	895	892	880	823	876	776	888	885	754	797	754	746	772	799	657
	Corriente (mA)	1.96	2.78	0.45	2.66	1.55	1.26	1.55	0.14	0.28	1.15	0.22	1.04	1.45	1.5	1.36	0.64	1.13	0.53	1.48	1.61	1.48	0.74	1.45	0.54	0.55
CCM5B	Voltaje (mV)	781	761	868	876	864	924	864	749	768	857	883	860	868	860	882	856	823	776	667	696	667	739	792	593	608
	Corriente (mA)	0.94	1.30	0.91	0.96	1.19	1.62	1.19	1.66	1.49	1.8	0.94	1.34	1.12	1.12	1.01	1.62	0.84	0.43	0.58	0.56	0.58	0.45	0.63	0.56	0.37
CCM6B	Voltaje (mV)	766	100	811	837	801	816	801	816	707	777	603	719	712	683	712	678	659	562	544	559	544	552	560	561	522
	Corriente (mA)	0.90	1.30	1.44	1.72	1.06	0.89	1.06	0.98	0.72	0.70	0.68	0.72	1.02	0.96	0.66	0.71	0.6	0.63	0.44	0.6	0.36	0.56	0.72	0.65	0.69
CCM7B	Voltaje (mV)	788	758	815	829	790	790	790	658	636	721	609	569	550	555	555	545	546	543	524	534	524	513	578	511	487
	Corriente (mA)	1.56	1.40	1.23	1.31	0.98	0.83	0.98	1.06	0.50	0.48	0.56	0.23	0.57	0.59	0.46	0.45	0.50	0.21	0.54	0.49	0.47	0.70	0.61	0.38	0.55
CCM8B	Voltaje (mV)	813	781	809	828	795	752	795	780	778	776	712	778	663	651	621	657	592	585	613	602	613	654	669	579	452
	Corriente (mA)	1.61	0.81	0.70	1.05	0.84	0.84	0.84	0.54	0.32	0.69	0.44	0.28	0.32	0.56	0.15	0.517	0.29	0.17	0.18	0.13	0.18	0.21	0.48	0.25	0.20
CCM9B	Voltaje (mV)	812	782	814	824	774	702	774	708	768	793	785	720	780	796	751	763	719	770	734	619	734	675	644	657	725
	Corriente (mA)	0.86	0.20	0.31	0.28	0.18	0.11	0.18	0.15	1.17	0.18	0.17	0.25	0.37	0.28	0.30	0.19	0.41	0.22	0.24	0.17	0.24	0.34	0.19	0.24	0.22

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21. Ficha de monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.**

Ficha 7. Monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.								
Código de celda	Parámetros	Número de días de toma de muestras						Porcentaje de remoción (%)
		Muestra inicial	Muestra día 3	Muestra día 6	Muestra día 9	Muestra día 12	Muestra día 15	
CCMA	Cadmio (mg/L)	0.236	0.0640	0.0513	0.0369	0.0336	0.0324	86.27
	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	1314.73	1315	1253	1429	1083	532	59.54
CCMB	Cadmio (mg/L)	0.236	0.0628	0.0520	0.0369	0.0345	0.0328	86.10
	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	1314.73	1320	1378	1533	1033	483	63.26

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22. Ficha de monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa.**

Ficha 8. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa.																
Código de celda	Parámetros fisicoquímicos del agua residual	Número de días de monitoreo														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CCMA	pH	7.49	7.6	7.94	8.43	8.66	8.57	8.48	8.55	8.62	8.45	8.61	8.61	8.57	8.6	8.61
	Temperatura (°C)	25	25	25	22.01	22.5	25	21.99	25	23.57	21.96	21.3	23.56	20.6	25	22.35
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	3690	3687	3542	3559	3286	3011	2747	2612	2356	2078	2005	1896	1581	1378	1491
	Oxígeno disuelto (mg/L)	4.73	4.57	14	14.16	17.06	17.29	18.14	18.73	19.31	19.65	20.74	20.97	23.32	25.79	26.35
	Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	1819	1816	1794	1743	1701	1685	1617	1550	1430	1390	1319	1249	1160	1003	854
	Turbidez (NTU)	398	291	284	278	260	255	254	229	204	189	164	145	95	89	57
CCMB	pH	7.44	7.58	7.89	8.34	8.65	8.59	8.55	8.52	8.46	8.53	8.53	8.44	8.52	8.55	8.56
	Temperatura (°C)	25	25	25	22.25	22.75	25	22.31	25	23.54	22.31	21.6	23.53	20.5	25	22.52
	Conductividad eléctrica (µS/cm)	3697	3696	3595	3529	3290	3034	2730	2532	2370	2045	1994	1712	1577	1381	1314
	Oxígeno disuelto (mg/L)	2.86	2.89	3.45	11.04	14.07	17.52	19.62	21.71	22.92	24.78	27.1	27.99	28.34	29.41	30.03
	Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	1849	1848	1764	1731	1709	1695	1630	1570	1460	1366	1330	1236	1082	937	774
	Turbidez (NTU)	314	294	285	276	240	240	228	196	184	158	132	114	101	93	63

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23.** Ficha de monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa.

<b>Ficha 9. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa.</b>																
<b>Código de celda</b>	<b>Parámetros electroquímicos</b>	<b>Número de días de monitoreo</b>														
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
CCMA	Voltaje (mV)	892	887	888	886	884	883	882	877	865	857	846	831	816	811	807
	Corriente (mA)	4.57	4.06	3.96	3.57	3.49	3.41	3.4	3.37	3.34	3.02	2.9	2.62	2.37	1.91	1.77
CCMB	Voltaje (mV)	894	883	885	887	884	884	879	870	862	854	848	834	822	808	803
	Corriente (mA)	4.61	4.21	4.02	3.78	3.65	3.45	3.45	3.39	3.23	3.14	2.86	2.56	2.25	1.86	1.71

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24.** Ficha de aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.

<b>Ficha 10. Aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.</b>					
<b>Código de cepa</b>	<b>Especie identificada</b>	<b>Tipo de microorganismo</b>	<b>Características microscópicas</b>	<b>Identidad (%)</b>	<b>Bionúmero</b>
CCMA-1	<i>Pseudomonas putida</i>	Bacteria	Bacilo Gram negativa	99.00	0003011103500350
CCMB-1	<i>Klebsiella oxytoca</i>	Bacteria	Bacilo Gram negativa	99.00	6705734657164010

Fuente: Elaboración propia.



Figura 22. Muestreo del agua residual municipal de la laguna de estabilización del distrito de Urpay, Provincia de Pataz, Departamento de La Libertad.



Figura 23. Construcción de las CCM.



Figura 24. Fabricación de los electrodos de carbón activado.

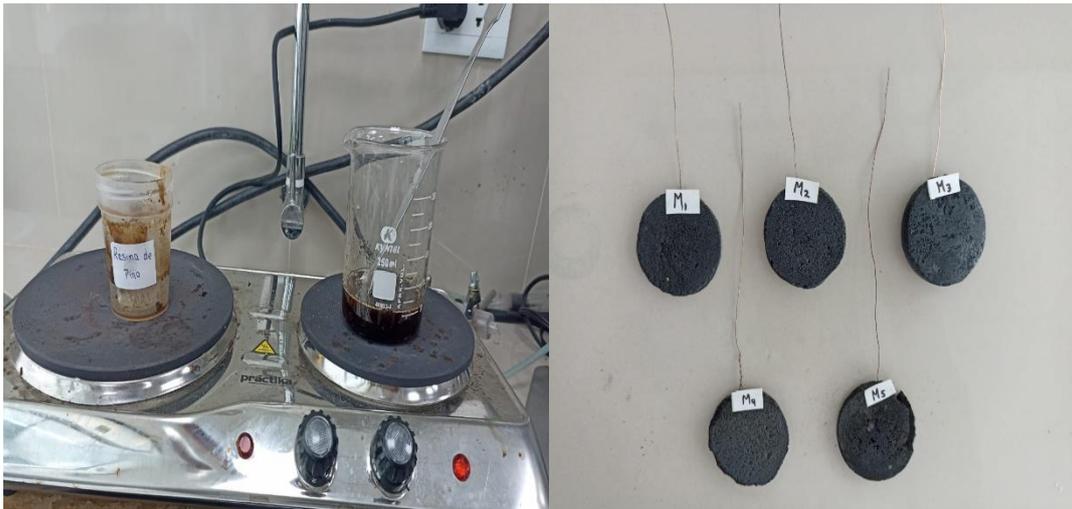


Figura 25. Impermeabilización de los electrodos de carbón activado.



Figura 26. Preparación del medio de cultivo e inóculo de *Chlorella sp.*

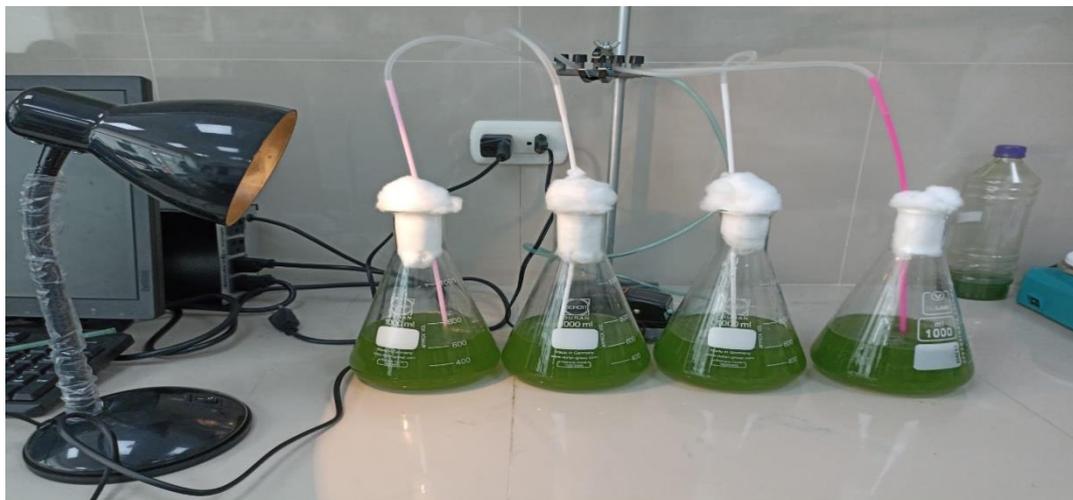


Figura 27. Iluminación y aireación para el crecimiento de *Chlorella sp.*

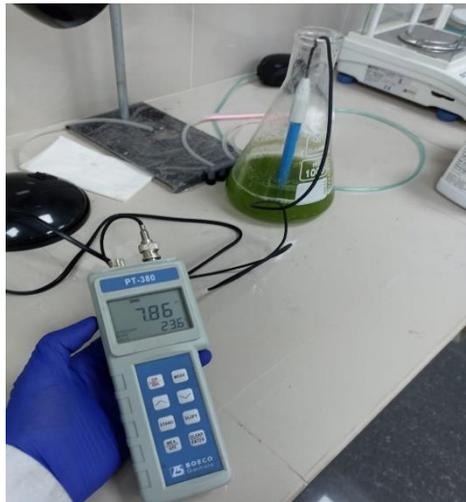


Figura 28. Medición de pH de la biomasa de *Chlorella* sp.



Figura 29. Caracterización del agua residual municipal.



Figura 30. Ajuste del pH del agua residual municipal.



Figura 31. Incorporación del agua residual municipal a las CCM.



Figura 32. Inoculación de las CCM con *Chlorella* sp. en la primera etapa.



Figura 33. Acondicionamiento de las CCM con bombas de aireación e iluminación artificial durante la primera etapa.



Figura 34. Monitoreo de voltaje y corriente de las CCM en la primera etapa operativa.



Figura 35. Monitoreo del pH del agua residual en la primera etapa operativa.



Figura 36. Monitoreo de la turbidez del agua residual en la primera etapa.



Figura 37. Toma de muestra de biomasa para conteo celular y medición de absorbancia.

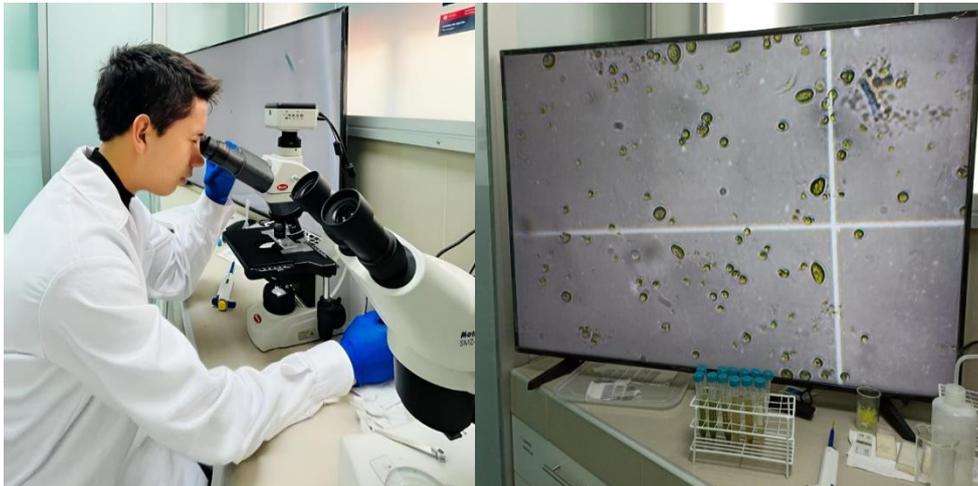


Figura 38. Conteo celular de *Chlorella sp.* en microscopio binocular.



Figura 39. Medición de absorbancia de *Chlorella sp.* en espectrofotómetro.

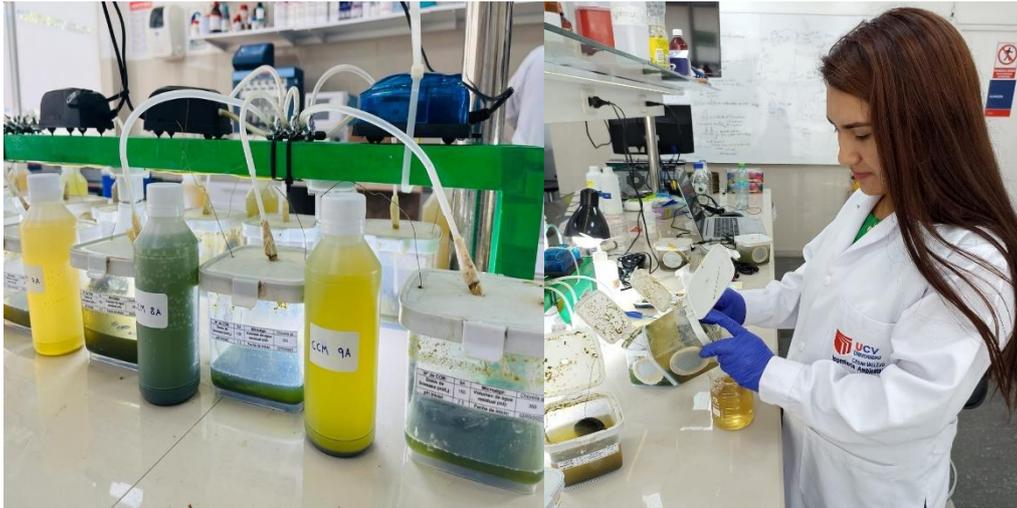


Figura 40. Toma de muestras de las CCM para analizar la concentración final de cadmio.



Figura 41. Conservación de muestras para el envío al laboratorio.

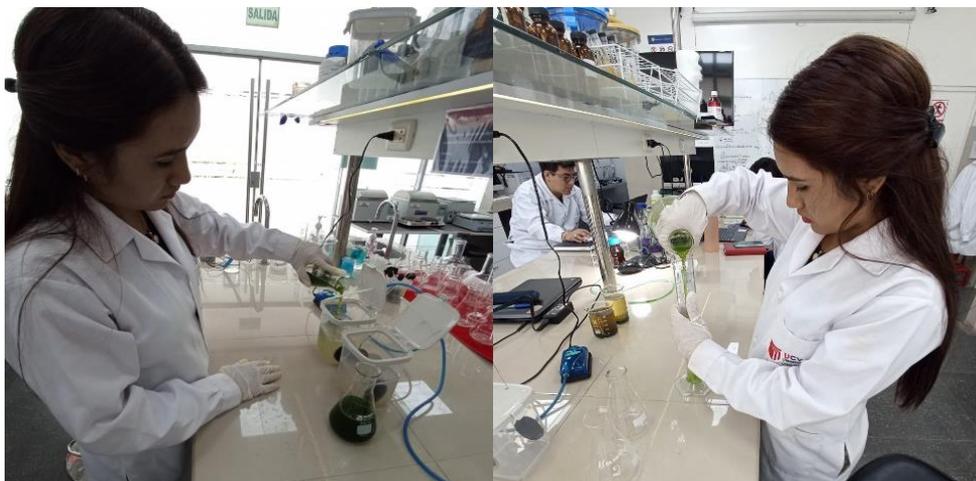


Figura 42. Incorporación del agua residual e inoculación de *Chlorella sp.* en las CCM para la segunda etapa operativa.



Figura 43. Acondicionamiento de bombas de aireación e iluminación artificial a las CCM en la segunda etapa operativa.



Figura 44. Monitoreo de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y solidos totales disueltos del agua residual en la segunda etapa operativa.



Figura 45. Monitoreo de la turbidez del agua residual en la segunda etapa.

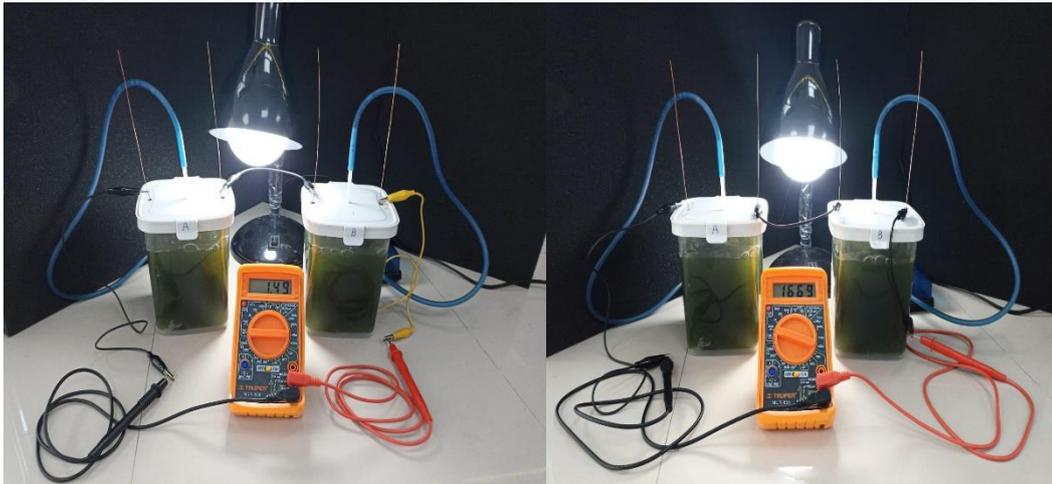


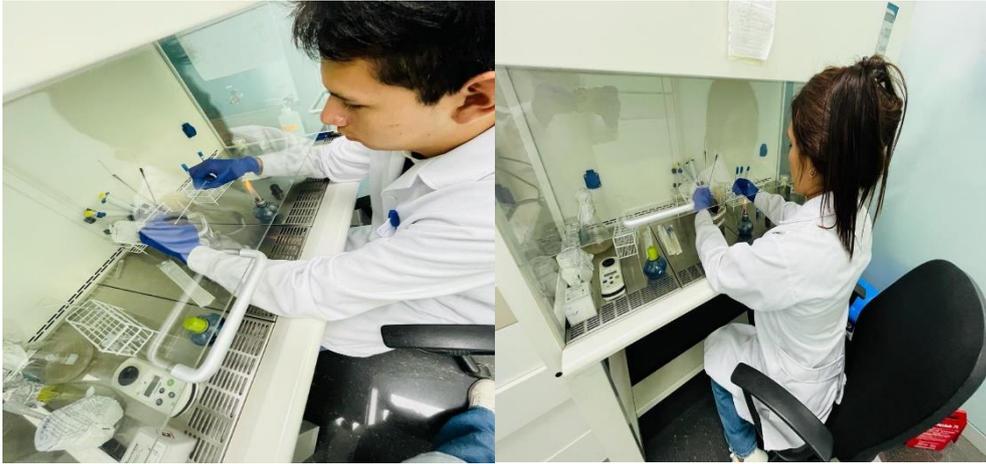
Figura 46. Monitoreo de voltaje y corriente de las CCM en la segunda etapa.



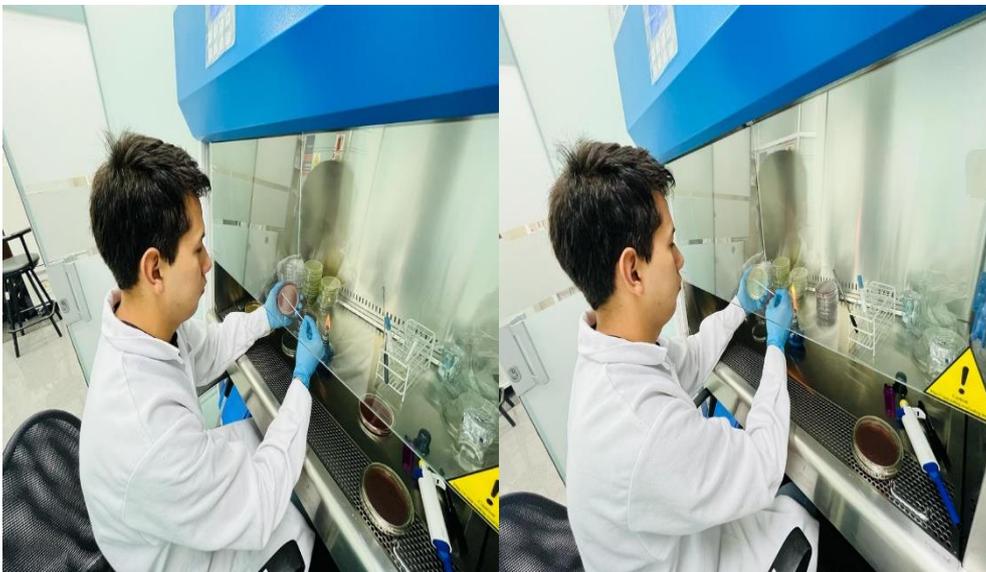
Figura 47. Toma de muestra del agua residual de las CCM cada 3 días para los análisis de cadmio y DQO.



Figura 48. Preservación de las muestras de agua residual a  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



*Figura 49.* Toma muestras por método de hisopado de los microorganismos del ánodo de las CCM de la segunda etapa operativa.



*Figura 50.* Sembrado de las muestras en medios de cultivo Agar MacConkey y Agar Sabouraud con 4% de glucosa.



*Figura 51.* Observación microscópica de las colonias de los microorganismos.



Figura 52. Suspensión de las cepas CCMA-1 y CCMB-1 en tubos de ensayo con solución salina estéril.



Figura 53. Medición de la densidad óptica de las cepas en suspensión con el Densicheck Plus VITEK-2.

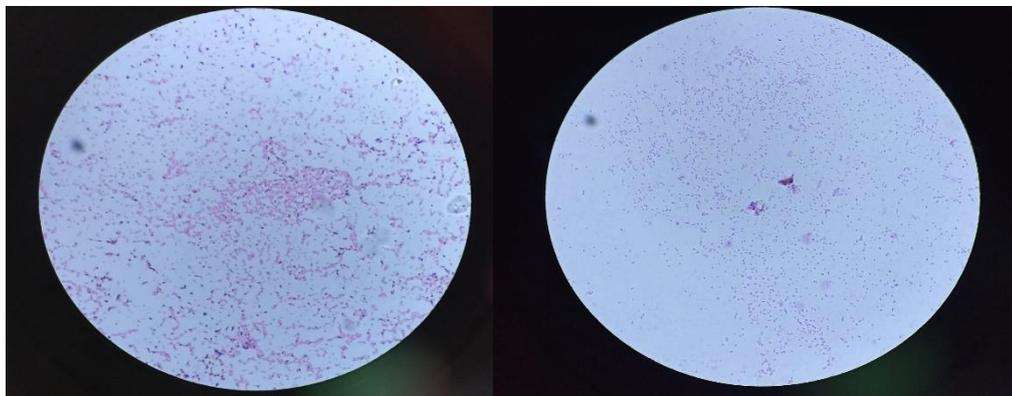


Figura 54. Tinción gram de los microorganismos identificados y observación microscópica.

**INFORME DE ENSAYO N° 077-2023**

**Cliente** : Rickelmi Agüero Quiñones.  
**Muestra** : Agua Residual Municipal  
**Código punto de muestreo** : P1 – P5  
**Procedencia** : Urpay, Pataz, La Libertad  
**Fecha y hora de muestreo\*** : 28 de febrero del 2023 – 1:00 pm  
**Recepción de la muestra** : En Laboratorio  
**Fecha de recepción de muestra** : 01 de marzo del 2023

Ensayo	Unidad	Resultados
Cadmio, Cd	mg/L	0.236
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O <sub>2</sub> /L	1314.73

A continuación, detallamos la metodología aplicada:

Ensayo	Metodología aplicada
Cadmio	Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, Section 3500-Cd, B. 23 th Edition. 2017.
DQO	Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, Section 5220–B. 23 th Edition. 2017.

\* La toma de muestra y condiciones de envío hasta recepción en el laboratorio es responsabilidad del cliente.

Trujillo, 03 de marzo del 2023.



Ing. Juan Sánchez Carrasco  
CIP 124131

C.c.Archivo.

Figura 55. Informe de ensayo de laboratorio: resultados de los análisis iniciales de cadmio y DQO del agua residual municipal.

## INFORME DE ENSAYO N°323-2023 RIVELAB

Emitido en Trujillo, 20 de abril de 2023

Pág. 1 de 1

SOLICITUD DE SERVICIO	:	130423AR
SOLICITANTE	:	Agüero Quiñones Rickelmi Alessander
TITULO DE TESIS	:	Biomasa de Chlorella sp. en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbiana
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA *	:	Urpay – Pataz – La Libertad
PROPOSITO DEL SERVICIO	:	Determinación de Cadmio
PRODUCTO DECLARADO	:	Agua residual
CANTIDAD DE MUESTRA	:	20 frascos con 250 ml de muestra
LUGAR Y FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	:	Laboratorio-Trujillo / 2023-04-13
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS	:	2023-04-20
FECHA DE TERMINO DE LOS ENSAYOS	:	2023-04-20

\* Muestra proporcionada por el cliente

### ENSAYO FISICOQUIMICO (FQ)

CODIGO DE MUESTRA	UNIDADES	RESULTADOS
CCM BA	ppm Cd	0.236
CCM 1A	ppm Cd	0.154
CCM 1B	ppm Cd	0.151
CCM 2A	ppm Cd	0.114
CCM 2B	ppm Cd	0.116
CCM 3A	ppm Cd	0.097
CCM 3B	ppm Cd	0.093
CCM 4A	ppm Cd	0.087
CCM 4B	ppm Cd	0.089
CCM 5A	ppm Cd	0.081
CCM 5B	ppm Cd	0.082
CCM 6A	ppm Cd	0.074
CCM 6B	ppm Cd	0.077
CCM 7A	ppm Cd	0.015
CCM 7B	ppm Cd	0.012
CCM 8A	ppm Cd	0.009
CCM 8B	ppm Cd	0.008
CCM 9A	ppm Cd	0.006
CCM 9B	ppm Cd	0.005

ENSAYO	NORMA O REFERENCIA
DETERMINACIÓN DE CADMIO	<i>Method 200.8, Revision 5.4, 1994/ EPA Method 200.8, Revision 5.4, 1994. VALIDATED (Applied out of reach), 2020 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry</i>



Dr. JOSE RIVERO CORCUERA  
Ingeniero Químico  
R. CIP. 130519

Este documento y la información contenida en él es confidencial y propiedad de LABORATORIO RIVERO SAC – RIVELAB SAC. No debe ser distribuido sin autorización, queda prohibida su modificación, reproducción parcial y/o total.

Figura 56. Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de cadmio de la primera etapa operativa.

## INFORME DE ENSAYO N°453-2023 RIVELAB

Emitido en Trujillo, 25 de mayo de 2023

Pág. 1 de 1

SOLICITUD DE SERVICIO	:	110523AR
SOLICITANTE TITULO DE TESIS	:	Agüero Quiñones Rickelmi Alessander
	:	Biomasa de Chlorella sp. en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbiana
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA <sup>(1)</sup>	:	Urpay – Pataz – La Libertad
PROPOSITO DEL SERVICIO	:	Determinación de Cadmio <sup>(2)</sup>
PRODUCTO DECLARADO	:	Agua residual
CANTIDAD DE MUESTRA	:	10 frascos con 50 ml de muestra
LUGAR Y FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	:	Laboratorio-Trujillo / 2023-05-11
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS FECHA DE	:	2023-05-12
TERMINO DE LOS ENSAYOS	:	2023-05-25

(1) Muestra proporcionada por el cliente

(2) Ensayo tercerizado

### ENSAYO FISICOQUIMICO (FQ)

CODIGO DE MUESTRA	UNIDADES	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
CCM 1A	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0640
CCM 1B	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0628
CCM 2A	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0513
CCM 2B	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0520
CCM 3A	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0369
CCM 3B	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0369
CCM 4A	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0336
CCM 4B	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0345
CCM 5A	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0324
CCM 5B	ppm Cd	0.0001	0.0002	0.0328

ENSAYO	NORMA O REFERENCIA
DETERMINACION DE CADMIO	<i>Method 200.8, Revision 5.4, 1994/ EPA Method 200.8, Revision 5.4, 1994, VALIDATED (Applied out of reach), 2020 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry</i>



Dr. JOSE RIVERO CORCUERA  
Ingeniero Químico  
R. CIP. 130519



Este documento y la información contenida en él es confidencial y propiedad de LABORATORIO RIVERO SAC – RIVELAB SAC. No debe ser distribuido sin autorización, queda prohibida su modificación, reproducción parcial y/o total.

**Figura 57.** Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de cadmio de la segunda etapa operativa.

## INFORME DE ENSAYO N°432-2023 RIVELAB

Emitido en Trujillo, 19 de mayo de 2023

Pág. 1 de 1

SOLICITUD DE SERVICIO	:	110523AR
SOLICITANTE	:	Agüero Quiñones Rickelmi Alessander
TITULO DE TESIS	:	Biomasa de Chlorella sp. en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbiana
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA *	:	Urpay – Pataz – La Libertad
PROPOSITO DEL SERVICIO	:	Determinación de Demanda Química de Oxígeno
PRODUCTO DECLARADO	:	Agua residual
CANTIDAD DE MUESTRA	:	10 frascos con 10 ml de muestra
LUGAR Y FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	:	Laboratorio-Trujillo / 2023-05-11
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS	:	2023-05-11
FECHA DE TERMINO DE LOS ENSAYOS	:	2023-05-13

\* Muestra proporcionada por el cliente

### ENSAYO FISICOQUIMICO (FQ)

CODIGO DE MUESTRA	UNIDADES	RESULTADOS
CCMA1	mg/l O <sub>2</sub>	1315
CCM A2	mg/l O <sub>2</sub>	1253
CCM A3	mg/l O <sub>2</sub>	1429
CCM A4	mg/l O <sub>2</sub>	1083
CCM A5	mg/l O <sub>2</sub>	532
CCM B1	mg/l O <sub>2</sub>	1320
CCM B2	mg/l O <sub>2</sub>	1378
CCM B3	mg/l O <sub>2</sub>	1533
CCM B4	mg/l O <sub>2</sub>	1033
CCM B5	mg/l O <sub>2</sub>	483

ENSAYO	NORMA O REFERENCIA
DETERMINACION DE DQO	NTP 360.501:2016 CALIDAD DE AGUA. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Método titulométrico a reflujo cerrado.

  
**Dr. JOSE RIVERO CORCUERA**  
 Ingeniero Químico  
 R. CIP. 130519

Figura 58. Informe de ensayo de laboratorio: resultados de análisis de la DQO de la segunda etapa operativa.

Cliente de bioMérieux: 1

Universidad César Vallejo

**Informe de examen**

Editado por: Labadmin

Equipo N°: 1

Aislamiento: CCMA-1 (Aprobado)

Tipo de tarjeta: GN Código de barras: 2412204403045880 Prueba de instrumento: 000019E2017E (VK2C-18806)

Técnico de preparación: Laboratory Administrator(Labadmin)

Bionúmero: 0003011103500350

Cantidad de organismo:

**Organismo seleccionado: Pseudomonas putida**

<b>Comentarios:</b>	

**Patrón McFarland: 0.62 (0.50 - 0.63)**

<b>Información de identificación</b>	<b>Tarjeta:</b> GN	<b>N° de lote:</b> 2412204403	<b>Fecha caduc.:</b> 09-dic-2023 12:00 COT
	<b>Estado:</b> Final	<b>Tiempo de análisis:</b> 6,80 horas	<b>Finalizado:</b> 17-may-2023 18:31 COT
<b>Origen del organismo</b>	VITEK 2		
<b>Organismo seleccionado</b>	99% Probabilidad <b>Pseudomonas putida</b> Bionúmero: 0003011103500350 Nivel de confianza: Identificación excelente		
<b>Organismos de análisis y pruebas a separar:</b>			
<b>Mensajes análisis:</b>			
<b>Perfil(es) típico(s) contraindicante(s)</b>			

<b>Detalles bioquímicos</b>																	
2	APPA	-	3	ADO	-	4	PyrA	-	5	IARL	-	7	dCEL	-	9	BGAL	-
10	H2S	-	11	BNAG	-	12	AGLTp	-	13	dGLU	+	14	GGT	+	15	OFF	-
17	BGLU	-	18	dMAL	-	19	dMAN	-	20	dMNE	+	21	BXYL	-	22	BAIap	-
23	ProA	+	26	LIP	-	27	PLE	-	29	TyrA	+	31	URE	-	32	dSOR	-
33	SAC	-	34	dTAG	-	35	dTRE	-	36	CIT	+	37	MNT	+	39	5KG	-
40	ILATk	+	41	AGLU	-	42	SUCT	+	43	NAGA	-	44	AGAL	-	45	PHOS	-
46	GlyA	-	47	ODC	-	48	LDC	-	53	IHISa	+	56	CMT	+	57	BGUR	-
58	O129R	+	59	GGAA	-	61	IMLTa	+	62	ELLM	-	64	ILATa	-			

Versión instalada de VITEK 2 Systems: 9.02

Guía de interpretación de CMI:

Nombre de juego de parámetros de AES:

Guía de interpretación terapéutica:

Última modificación de parámetros de AES:

Página 1 de 2

Figura 59. Informe de identificación bioquímica de *Pseudomonas putida*.

Cliente de bioMérieux: 1

Equipo N°: 1

Editado por: Labadmin

Aislamiento: CCMB-1 (Aprobado)

Tipo de tarjeta: GN Código de barras: 2412204403045881 Prueba de instrumento: 000019E2017E (VK2C-18806)

Técnico de preparación: Laboratory Administrator(Labadmin)

Bionúmero: 6705734657164010

Cantidad de organismo:

**Organismo seleccionado: Klebsiella oxytoca**

<b>Comentarios:</b>	

**Patrón McFarland: 0.59 (0.50 - 0.63)**

<b>Información de identificación</b>	<b>Tarjeta:</b> GN	<b>N° de lote:</b> 2412204403	<b>Fecha caduc.:</b> 09-dic-2023 12:00 COT
	<b>Estado:</b> Final	<b>Tiempo de análisis:</b> 3,85 horas	<b>Finalizado:</b> 17-may-2023 15:34 COT
<b>Origen del organismo</b>	VITEK 2		
<b>Organismo seleccionado</b>	99% Probabilidad <b>Klebsiella oxytoca</b> Bionúmero: 6705734657164010 Nivel de confianza: Identificación excelente		
<b>Organismos de análisis y pruebas a separar:</b>			
<b>Mensajes análisis:</b>			
<b>Perfil(es) típico(s) contraindicante(s)</b>			

<b>Detalles bioquímicos</b>																	
2	APPA	-	3	ADO	+	4	PyrA	+	5	IARL	+	7	dCEL	+	9	BGAL	+
10	H2S	-	11	BNAG	-	12	AGLTp	-	13	dGLU	+	14	GGT	-	15	OFF	+
17	BGLU	+	18	dMAL	+	19	dMAN	+	20	dMNE	+	21	BXYL	+	22	BAlap	-
23	ProA	-	26	LIP	-	27	PLE	+	29	TyrA	-	31	URE	+	32	dSOR	+
33	SAC	+	34	dTAG	-	35	dTRE	+	36	CIT	+	37	MNT	+	39	5KG	+
40	ILATk	+	41	AGLU	-	42	SUCT	-	43	NAGA	-	44	AGAL	+	45	PHOS	+
46	GlyA	-	47	ODC	-	48	LDC	+	53	IHISa	-	56	CMT	-	57	BGUR	-
58	O129R	+	59	GGAA	-	61	IMLTa	-	62	ELLM	-	64	ILATa	-			

Versión instalada de VITEK 2 Systems: 9.02

Guía de interpretación de CMI:

Nombre de juego de parámetros de AES:

Guía de interpretación terapéutica:

Última modificación de parámetros de AES:

Figura 60. Informe de identificación bioquímica de *Klebsiella oxytoca*.

**SOLICITUD:** Validación de instrumentos de recolección de datos.

Trujillo, 12 de mayo del 2023

**Estimado:** Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Nosotros, Agüero Quiñones Rickelmi Alessander identificado con DNI N° 72106431 y Ávila Sánchez Zairi Marilú identificada con DNI N° 76727677 estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad César Vallejo - Trujillo, nos presentamos a usted con el debido respeto y le manifestamos:

Que, siendo requisito indispensable el recojo de datos necesarios para el desarrollo de la investigación titulada: "Biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbianas", solicitamos a usted tenga a bien validar el instrumento que adjuntamos bajo los criterios académicos correspondientes. Para este efecto adjuntamos los siguientes documentos:

- Matriz de operacionalización de variables.
- Instrumentos de recolección de datos.
- Fichas de evaluación de los instrumentos.

Por tanto:

A usted, suplicamos acceder a nuestra petición.



Agüero Quiñones Rickelmi Alessander

DNI: 72106431



Ávila Sánchez Zairi Marilú

DNI: 76727677

Figura 61. Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 1**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 1. Muestreo de aguas residuales municipales.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.									X	
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y ocho



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.R. Nº 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 62. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 2**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto  
 1.6. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV  
 1.2. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental  
 1.3. Nombre del instrumento: Ficha 2. Características iniciales del agua residual municipal  
 1.4. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.									X		
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
99	Noventa y nueve



Luis A. Cabanillas Chirinos  
 BIÓLOGO - MICROBIÓLOGO  
 C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 63. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 3**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 3. Medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de *Chlorella sp.*
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y ocho



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIÓLOGO - MICROBIÓLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 64. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 4**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 4. Monitoreo y remoción de cadmio del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MINIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X	
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X	
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X	
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
96	Noventa y seis



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 65. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 5**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.									X		
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.									X		
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIÓLOGO - MICROBIÓLOGO  
C.B.P. N° 9282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 66. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 6**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 6. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MINIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X	
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIÓLOGO - MICROBIÓLOGO  
C.S.P. N° 8292

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 67. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 7**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 7. Monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 68. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 8**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 8. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.									X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 69. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 9**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 9. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MINIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.									X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 70. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el primer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 10**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Cabanillas Chirinos Luis Alberto
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Coordinador del Instituto de Investigación en Ciencias Aplicadas - UCV
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Microbiología Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 10. Aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.									X	
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.									X	
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

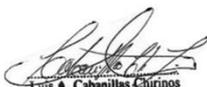
**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
96	Noventa y seis



Luis A. Cabanillas Chirinos  
BIOLOGO - MICROBIOLOGO  
C.B.P. N° 8282

Mblgo. Cabanillas Chirinos Luis Alberto

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 71. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el primer especialista.

**SOLICITUD:** Validación de instrumentos de recolección de datos.

Trujillo, 12 de mayo del 2023

**Estimado:** Dr. Rivero Corcuera José Martin

Nosotros, Agüero Quiñones Rickelmi Alessander identificado con DNI N° 72106431 y Ávila Sánchez Zairi Marilú identificada con DNI N° 76727677 estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad César Vallejo - Trujillo, nos presentamos a usted con el debido respeto y le manifestamos:

Que, siendo requisito indispensable el recojo de datos necesarios para el desarrollo de la investigación titulada: "Biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbianas", solicitamos a usted tenga a bien validar el instrumento que adjuntamos bajo los criterios académicos correspondientes. Para este efecto adjuntamos los siguientes documentos:

- Matriz de operacionalización de variables.
- Instrumentos de recolección de datos.
- Fichas de evaluación de los instrumentos.

Por tanto:

A usted, suplicamos acceder a nuestra petición.



Agüero Quiñones Rickelmi Alessander  
DNI: 72106431



Ávila Sánchez Zairi Marilú  
DNI: 76727677

Figura 72. Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 1**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 1. Muestreo de aguas residuales municipales.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 73. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 2**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 2. Características iniciales del agua residual municipal
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.									X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.									X	
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.									X	
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP: 130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 74. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 3**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 3. Medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de *Chlorella sp.*
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y ocho



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 75. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 4**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 4. Monitoreo y remoción de cadmio del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
99	Noventa y nueve



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 76. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 5**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y ocho




---

Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP: 130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 77. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 6**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 6. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X	
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 78. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 7**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 7. Monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación


**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y ocho



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 79. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 8**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 8. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.									X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 80. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 9**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 9. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X	

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
98	Noventa y siete



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

*Figura 81.* Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el segundo especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 10**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rivero Corcuera José Martín
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Profesor Auxiliar – Universidad Nacional de Trujillo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Doctorado en Ingeniería Ambiental
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 10. Aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.									X	
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios Científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.								X		
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o Científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.								X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
97	Noventa y siete



Dr. José M. Rivero Corcuera  
CIP:130519

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 82. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el segundo especialista.

**SOLICITUD:** Validación de instrumentos de recolección de datos.

Trujillo, 12 de mayo del 2023

**Estimado:** Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés

Nosotros, Agüero Quiñones Rickelmi Alessander identificado con DNI N° 72106431 y Ávila Sánchez Zairi Marilú identificada con DNI N° 76727677 estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad César Vallejo - Trujillo, nos presentamos a usted con el debido respeto y le manifestamos:

Que, siendo requisito indispensable el recojo de datos necesarios para el desarrollo de la investigación titulada: "Biomasa de *Chlorella sp.* en la remoción de cadmio y DQO de aguas residuales municipales usando celdas de combustible microbianas", solicitamos a usted tenga a bien validar el instrumento que adjuntamos bajo los criterios académicos correspondientes. Para este efecto adjuntamos los siguientes documentos:

- Matriz de operacionalización de variables.
- Instrumentos de recolección de datos.
- Fichas de evaluación de los instrumentos.

Por tanto:

A usted, suplicamos acceder a nuestra petición.



Agüero Quiñones Rickelmi Alessander  
DNI: 72106431



Ávila Sánchez Zairi Marilú  
DNI: 76727677

Figura 83. Solicitud de validación de instrumentos de recolección de datos para el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 1**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 1. Muestreo de aguas residuales municipales.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.										X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



\_\_\_\_\_  
 Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
 CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

**Figura 84.** Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 1 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 2**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 2. Características iniciales del agua residual municipal
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.										X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.										X
4. Organización	Existe una organización lógica.								X		
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales										X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.										X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.										X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.										X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.										X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.										X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
99	Noventa y nueve



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 85. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 2 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 3**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 3. Medio de cultivo y características fisicoquímicas iniciales de *Chlorella sp.*
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.										X	
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.									X		
4. Organización	Existe una organización lógica.									X		
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.									X		
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.									X		
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.									X		
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.									X		

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
93	Noventa y tres



Mgr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 86. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 3 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 4**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 4. Monitoreo y remoción de cadmio del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.									X		
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
99	Noventa y nueve



\_\_\_\_\_  
 Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
 CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

**Figura 87.** Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 4 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 5**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 5. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

X

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 88. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 5 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 6**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 6. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la primera etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 89. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 6 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 7**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 7. Monitoreo de cadmio y demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 90. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 7 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 8**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 8. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua residual para la segunda etapa operativa.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 91. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 8 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 9**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 9. Monitoreo de parámetros electroquímicos de las CCM para la segunda etapa operativa
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											x

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgtr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 92. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 9 por el tercer especialista.

**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO N° 10**
**I. DATOS GENERALES**

- 1.1. Apellidos y Nombres: Rojas Villacorta Walter Andrés
- 1.2. Cargo e institución donde labora: Docente Renacyt / Universidad Cesar Vallejo
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: Biotecnología Ambiental y Microbiología
- 1.4. Nombre del instrumento: Ficha 10. Aislamiento e identificación de la comunidad microbiana del ánodo de las CCM.
- 1.5. Autores de Instrumento: Agüero Quiñones Rickelmi Alessander – Ávila Sánchez Zairi Marilú

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN**

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE			MÍNIMAMENTE ACEPTABLE				ACEPTABLE			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Claridad	Está formulado con lenguaje comprensible.											X
2. Objetividad	Está adecuado a las leyes y principios científicos.											X
3. Actualidad	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											X
4. Organización	Existe una organización lógica.											X
5. Suficiencia	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											X
6. Intencionalidad	Está adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											X
7. Consistencia	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											X
8. Coherencia	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											X
9. Metodología	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											X
10. Pertinencia	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											X

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD**

- El Instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

x

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

En números	En letras
100	Cien



Mgr. Rojas Villacorta Walter Andrés  
CBP: 12048

Trujillo, 12 de mayo del 2023

Figura 93. Ficha de validación de instrumento de recolección de datos N° 10 por el tercer especialista.