

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CROMO CON CULTIVOS
DE MICROALGAS EN UN FOTOBIORREACTOR
DE PANEL PLANO**

**LAURA ANGÉLICA FONSECA BUITRAGO
MARÍA PAULA GUARÍN PRIETO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CROMO CON CULTIVOS
DE MICROALGAS EN UN FOTOBIORREACTOR
DE PANEL PLANO**

**LAURA ANGÉLICA FONSECA BUITRAGO
MARÍA PAULA GUARÍN PRIETO**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
DIEGO RUBIO FERNÁNDEZ
m.Sc. Biólogo**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

Nota de aceptación (Dirección de investigaciones)

Presidente del jurado

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá, D.C., Agosto 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director General de Investigación y Proyección Social

Dr. Manuel Cancelado Jiménez

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, agradecemos a la Fundación Universidad de América por proporcionarnos los conocimientos necesarios y las herramientas para el desarrollo de este proyecto en el grupo de investigación BIOTECFUA.

Agradecemos a nuestro director Diego Rubio, biólogo investigador de la Universidad de América, por brindarnos consejos y sus conocimientos a lo largo de este trabajo, para culminar con éxito la investigación.

Por último, agradecemos a nuestros padres por su apoyo incondicional y por creer en nosotras, adicionalmente agradecemos el apoyo de los docentes que atendieron amablemente las consultas e inquietudes, en especial al Ingeniero Químico Juan Andrés Sandoval.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 TRATAMIENTO DEL AGUA CON MICROALGAS	19
1.2 INCORPORACIÓN DE METALES PESADOS EN BIOMASA MICROALGAL	20
1.3 TOXICIDAD DEL CROMO	21
1.4 SCENEDESMUS DIMORPHUS	22
1.5 CONDICIONES PARA LAS MICROALGAS EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	23
1.5.1 La luz	23
1.5.2 Temperatura	24
1.5.3 Niveles de aireación	24
1.5.4 Rango de ph	24
1.6 CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA	24
1.6.1 Conteos	24
1.6.2 Curva de crecimiento	26
1.6.2.1 Fase de adaptación	27
1.6.2.2 Fase exponencial	27
1.6.2.3 Fase estacionaria	27
1.6.2.4 Fase de muerte	27
1.6.3 Velocidad específica de crecimiento	27
1.7 FOTOBIORREACTOR DE PANEL PLANO	28
1.8 FOTOBIORREACTOR ADAPTADO	28
1.9 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE	29
2. METODOLOGÍA	31
2.1 PRIMERA ETAPA	33
2.1.1 Revisión bibliográfica	33
2.2 SEGUNDA ETAPA	33
2.2.1 Pre-Selección teórica de la forma química del cromo	33
2.2.2 Cepa microalgal	34
2.2.3 Condiciones del cultivo	34
2.2.3.1 Iluminación	34
2.2.3.2 Agitación	34
2.2.3.3 Nutrientes	34
2.2.4 Producción de inóculo microalgal	35
2.2.4.1 Preparación del inóculo microalgal	35

2.2.5	Pre-Experimento	36
2.2.5.1	Cuantificación de la biomasa	37
2.2.5.2	Velocidad específica de crecimiento (μ)	37
2.2.5.3	Pre-Experimento No. 1	38
2.2.5.4	Pre-experimento No. 2	39
2.2.5.5	Análisis estadístico	40
2.3	TERCERA ETAPA	41
2.3.1	Desarrollo experimental	41
2.3.2	Peso seco y productividad volumétrica	42
2.3.3	Concentración final de cromo	44
2.3.4	Porcentaje de remoción	44
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
3.1	PRIMERA ETAPA	45
3.1.1	Revisión bibliográfica	45
3.2	SEGUNDA ETAPA	48
3.2.1	Producción del inóculo microalgal	48
3.2.2	Pre-Selección teórica del estado de oxidación del Cr	48
3.2.3	Pre-experimento 1	48
3.2.3.1	Velocidad específica de crecimiento Pre Experimento 1	49
3.2.4	Pre-experimento 2	50
3.2.4.1	Primera réplica	51
3.2.4.2	Segunda réplica	53
3.2.4.3	Análisis estadístico Pre-experimento 2	55
3.2.5	Resultados velocidades específicas crecimiento (Pre experimento 2)	56
3.3	TERCERA ETAPA	56
3.3.1	Desarrollo experimental	56
3.3.2	Primera réplica	57
3.3.2.1	Velocidad específica de crecimiento Experimento. Primera réplica	58
3.3.2.2	Peso seco y productividad volumétrica	58
3.3.2.3	Concentración final de cromo	59
3.3.3	Segunda réplica	60
3.3.3.1	Velocidad específica de crecimiento Experimento. Segunda réplica	62
3.3.4	Análisis estadístico experimento	64
4.	CONCLUSIONES	64
5.	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFIA	66
	ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Relaciones de volumen para el montaje del Pre-experimento 1	38
Tabla 2. Relaciones de volumen para el montaje del Pre-experimento 2	39
Tabla 3. Relaciones de volumen para el montaje del Experimento	40
Tabla 4. Información revisión y recopilación bibliográfica	45
Tabla 5. Velocidad específica de crecimiento μ , Pre-experimento 1	49
Tabla 6. Análisis de varianza de un factor para el Pre-experimento 1	50
Tabla 7. Velocidad específica de crecimiento μ . Pre experimento 2, Primera réplica	53
Tabla 8. Velocidad específica de crecimiento μ , Pre-experimento 2, Segunda réplica	55
Tabla 9. Análisis de varianza de dos factores para el pre-experimento 2	54
Tabla 10. Velocidad específica de crecimiento (μ) experimento. Primera réplica	57
Tabla 11. Peso seco y productividad volumétrica primera réplica	58
Tabla 12. Velocidad específica de crecimiento μ experimento, Segunda réplica	60
Tabla 13. Análisis de varianza de dos factores para el experimento	61

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 1. Óxido de cromo	50
Gráfica 2. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en medio con óxido de cromo (III)	51
Gráfica 3. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 2, Primera réplica Dicromato de potasio	53
Gráfica 4. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en medio con dicromato de potasio. Primera réplica	54
Gráfica 5. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 2, Segunda réplica	55
Gráfica 6. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en medio con dicromato de potasio. Segunda réplica	56
Gráfica 7. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en medio con dicromato de potasio. Segunda réplica	57
Gráfica 8. Curvas de crecimiento y concentración celular experimento. Primera réplica	58
Gráfica 9. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactor adaptado. Primera réplica	59
Gráfica 10. Curvas de crecimiento y concentración celular experimento. Segunda réplica	61
Gráfica 11. Velocidad específica de crecimiento para <i>Scenedesmus dimorphus</i> evaluada en fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactor adaptado. Segunda réplica	62

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Concentración celular en células por mililitro [cel/mL]	36
Ecuación 2. Cálculo de velocidad específica de crecimiento (μ)	37
Ecuación 3. Concentración de cromo	37
Ecuación 4. Determinación de peso seco (PST)	42
Ecuación 5. Productividad volumétrica	43
Ecuación 6. Porcentaje de remoción de cromo	43

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Reacción química óxido de cromo (III)	37
Reacción 2. Reacción química Dicromato de potasio	38

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Protocolo para puesta en marcha del fotobiorreactor de panel plano	71
Anexo B. Composición fertilizante agrícola foliagro	72
Anexo C. Técnica aséptica	73
Anexo D. Protocolo para la determinación de peso seco	74
Anexo E. Concentración celular y curvas de crecimiento del pre-experimento 1 óxido de cromo	75
Anexo F. Concentración celular y curvas de crecimiento del pre experimento 2. primera réplica dicromato de potasio	82
Anexo G. Concentración celular y curvas de crecimiento del pre experimento 2. segunda réplica dicromato de potasio	89
Anexo H. Crecimiento y concentración celular promedio de las 3 repeticiones experimento. Primera réplica	96
Anexo I. Crecimiento y concentración celular promedio de las 3 repeticiones experimento. Segunda réplica	100
Anexo J. Resultados concentración final de cromo	102

ABREVIATURAS

°C:	Grados centígrados
CO ₂ :	Dióxido de carbono
cel:	Células
cm:	Centímetro
DBO:	Demanda biológica de oxígeno
DQO:	Demanda química de oxígeno
g:	Gramo
L:	Litros
mL:	Mililitro
mg:	Miligramo
O ₂ :	Oxígeno
V/V:	Proporción volumen/volumen
μ:	Velocidad específica de crecimiento
μm:	Micrómetro
μL:	Microlitro

GLOSARIO

BIOMASA: materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente en energía.

CÁMARA DE NEUBAUER: instrumento utilizado en medicina y biología para realizar el recuento de células en un medio líquido.

CULTIVO: conjunto de microorganismos que crecen en un recipiente, con el objetivo de producir biomasa o un metabolito de interés.

INÓCULO: suspensión de microorganismos que administran a un ser vivo de forma voluntaria o involuntariamente a tejidos vivos o a un medio de cultivo por inoculación.

FERTILIZANTE: cualquier material orgánico o inorgánico, natural o sintético, que se adiciona al suelo con la finalidad de suplir en determinados elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.

FOTOBIOREACTOR: sistema capaz de generar la fotosíntesis de las clorofilas existentes en los microorganismos, tales como las microalgas marinas.

MICROALGA: microorganismos que contiene clorofila a y otros pigmentos fotosintéticos, capaces de realizar la fotosíntesis oxigénica.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se determinó la capacidad de remoción de cromo usando la microalga *Scenedesmus dimorphus* y la incidencia del fotobiorreactor de panel plano y del fotobiorreactor adaptado en el proceso, este último es un recipiente de vidrio cilíndrico, que cuenta con tres aberturas en la tapa, dos para la agitación y una para la desgasificación.

A partir de la revisión bibliográfica de artículos que hayan realizado tratamiento de remoción de cromo con cultivos de microalgas, se definió un rango de concentración de cromo a escala laboratorio, mínimo y máximo encontrada, que corresponde a [1-300 mg/L], y por otra parte se determinó la forma química del cromo trabajada en dichos tratamientos, las cuales fueron Cr^{+3} y Cr^{+6} . Para el desarrollo pre experimental, se tomaron 6 concentraciones de cromo dentro del rango establecido, 50mg/L, 100mg/L, 150 mg/L, 200mg/L, 250 mg/L, 300 mg/L y cada uno de los pre experimentos tuvo una concentración equivalente de las dos formas químicas del cromo, Cr^{+3} con óxido de cromo (Cr_2O_3) y Cr^{+6} con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), para así determinar el mejor resultado entre las concentraciones y entre las formas químicas del cromo. El crecimiento de la microalga *Scenedesmus dimorphus* es mayor en la concentración de 100 mg/L de cromo en la que se obtuvo una concentración celular ($1,88\text{E}+06$ cel/mL) y velocidad específica de crecimiento ($0,215 \text{ d}^{-1}$) para la muestra que contiene óxido de cromo (Cr_2O_3). Para las muestras con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) la concentración celular ($1,52\text{E}+06$ cel/mL primera réplica y $1,97\text{E}+06$ segunda réplica) y la mayor velocidad específica de crecimiento ($0,129 \text{ d}^{-1}$ y $0,155 \text{ d}^{-1}$) es mayor en la muestra que contiene 100 mg/L de concentración de cromo en los dos casos. Por tanto, se decide usar esta concentración y el dicromato de potasio en la realización del experimento, por su poca sedimentación en el medio. En el experimento se usa el fotobiorreactor de panel plano y el fotobiorreactor adaptado, en los cuales se evidenció un mayor crecimiento de concentración celular ($2,67\text{E}+05$ cel/mL y $2,63\text{E}+05$) y una mayor velocidad específica de crecimiento ($0,053 \text{ d}^{-1}$ y $0,054 \text{ d}^{-1}$).

Se realizan análisis de laboratorio por método colorimétrico para concentración final de cromo en el fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactor adaptado arrojando un porcentaje de remoción en el día 14 de experimento de 25,4% y 35,9% respectivamente.

PALABRAS CLAVE: biomasa, concentración, cromo, fotobiorreactor, microalgas remoción, *Scenedesmus dimorphus*

INTRODUCCIÓN

Pese a que el agua representa un recurso imprescindible para los seres vivos, actualmente presenta grandes índices de contaminación por la presencia de compuestos orgánicos, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos, considerándose como uno de los mayores problemas medioambientales de nuestros días.

El uso de microalgas como tratamientos terciarios es una alternativa interesante para reducir concentraciones de nutrientes y lograr la eliminación de metales pesados, especialmente cromo presente en efluentes industriales¹, puesto que los gastos operacionales y de mantenimiento son mucho más bajos y la eficiencia es igualmente alta². Además, la biomasa producida representa una fuente potencial de alimento, químicos y pigmentos, entre otros productos de interés³. Especies como *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella miniata*, *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana* se destacan por eliminar de manera eficiente metales pesados en las aguas residuales, además de poder crecer en medios contaminados⁴.

De acuerdo con lo expresado anteriormente sobre metales pesados, surge la necesidad de aprovechar la capacidad de las microalgas para remover cromo, dado que este es el metal pesado con mayor concentración en el sistema hídrico de Bogotá, afectando al río Tunjuelito por actividad de curtiembres⁵ y a la población que consume esta agua. De esta forma, el uso de microalgas contribuye a la sostenibilidad ambiental y a reducir el impacto generado por la contaminación.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que recientemente se ha empleado el uso de microalgas como depuradoras de agua, en este proyecto se evaluará la remoción de cromo con *Scenedesmus dimorphus* en dos fotobiorreactores, panel plano y adaptado, esperando que exista un aumento en la acumulación de biomasa y una reducción de la concentración final de cromo.

¹ RAOUF, N., HOMAIDAN, A., IBRAHEEM, I. Microalgas y tratamiento de aguas residuales. En: Revista Saudita de Ciencias Biológicas. (2012) p. 257-275.

² CANDELA, ORDUZ, R. D. Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bucaramanga, Colombia. (2016) p. 28.

³ ROA PARRA, A. L., CAÑIZARES VILLANUEVA, R. O. Biorremediación de aguas con fosfatos y nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado. En: Bistua: revista de la facultad de ciencias básicas. Universidad de Pamplona. Colombia. (2012) p. 71.

⁴ CANDELA, ORDUZ, R. D. Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bucaramanga, Colombia. (2016) p. 38.

⁵ ORTIZ, N., CARMONA, J. Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. Universidad de Caldas (2015) p. 119.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la incidencia de un fotobiorreactor de panel plano en la remoción de cromo a partir de cultivos de *Scenedesmus dimorphus*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las concentraciones de cromo que se añadirán al medio de cultivo.
- Efectuar el seguimiento al cultivo y a los niveles de cromo a nivel de fotobiorreactor y de recipientes de vidrio.
- Analizar estadísticamente la remoción de cromo y el rendimiento de producción de biomasa obtenidos bajo las condiciones establecidas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 TRATAMIENTO DEL AGUA CON MICROALGAS

Las microalgas son organismos unicelulares que en los últimos años han sido objeto de un sin número de investigaciones científicas, esto por su capacidad de depurar contaminantes que hay presentes en el agua por medio de tratamientos biológicos, donde las microalgas absorben elementos nutritivos y los asimilan, incorporándolos a su biomasa. Este tipo de procesos biológicos no requieren equipos sofisticados ni costosos; tampoco generan subproductos indeseados⁶.

Los científicos informan que el agua residual contiene diferentes tipos de materiales solubles orgánicos, inorgánicos, materiales inorgánicos insolubles, macro sólidos, toxinas, etc. Los cuales pueden constituir un medio apropiado para el crecimiento de microalgas⁷; en este caso convertirían la energía solar en materia orgánica celular y calor, el calor que se genera acelera el tratamiento anaerobio y aerobio de los residuos y al mismo tiempo acelera la muerte de especies patógenas que se puedan presentar en el agua⁸.

La mayoría de los contaminantes retirados por medio de las microalgas, se eliminan por absorción celular directa⁹. Las microalgas son capaces de degradar materia orgánica y compuestos orgánicos, lo que determina que estas pueden ser agente en la biorremediación de aguas con contaminantes orgánicos y de biorremoción de metales pesados presentes en el agua. Lo que considera este tipo de tratamiento como amigable con el medio ambiente¹⁰.

Anteriormente se ha utilizado la microalga *Scenedesmus Sp* para la remoción de amonio y fósforo del agua residual agroindustrial utilizando biorreactores¹¹. Para los procesos de remoción de contaminantes, las microalgas asimilan estos nutrientes incorporándoles a su biomasa. La eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas por medio de la utilización de microalgas depende de varios factores, como,

⁶ OLARTE, E; VALENCIA, M. Evaluación del uso de la microalga *Chlorella vulgaris* en el tratamiento de aguas residuales industriales (Vinanzas). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2016). p. 10-11.

⁷ S. Sriram; R. Seenivasan. Cultivo de microalgas en aguas residuales para la eliminación de nutrientes. J. Algal Biomass Utiln. (2012), p. 9- 13.

⁸ ARCILA, J. Generación de gránulos y aglomerados microalga-bacteria para el tratamiento de aguas residuales municipales y producción de metano. Universidad Nacional Autónoma de México. (2017)- p 88-89.

⁹ MARTINEZ L. Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas. Universidad de León. (2012). p. 17.

¹⁰ MONTES, M. Desarrollo de un bioestimulante a base de microalgas y Bacterias para el tratamiento de influentes residuales. Maestría. Instituto politécnico Nacional. (2010). p. 13

¹¹ ANDRADE, C., VERA, A., CÁRDENAS, C., MORALES, E. Producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus sp*. Con aguas residuales de la industria pesquera. Universidad De Zulia (2009) p.1

por ejemplo: El tipo de agua a tratar, que puede ser agua residual agropecuaria, agua residual residencial o de alguna otra industria específica; las características de operación; el tipo de contaminantes (que afecten la composición de la biomasa); la temperatura y la intensidad lumínica¹².

Se conoce que las microalgas tienen afinidad por los metales, de ahí la perspectiva de su posible uso como agente descontaminante en aguas que contengan residuos de iones metálicos en disolución¹³. Por consiguiente, el uso de microalgas como tratamientos terciarios donde se elimina la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos es una alternativa interesante para reducir concentraciones de nutrientes y lograr la eliminación de metales pesados, especialmente cromo, presentes en estas aguas¹⁴.

1.2 INCORPORACIÓN DE METALES PESADOS EN BIOMASA MICROALGAL

El proceso de incorporación de metales pesados a la biomasa de las microalgas se realiza en dos etapas, la primera, mejor llamada eliminación pasiva, es un proceso en donde los iones de los metales pesados se adsorben a la superficie de la célula por interacciones electrostáticas, esto debido a la composición de las paredes celulares que están constituidos por proteínas que a su vez se encuentran formadas por aminoácidos que proporcionan grupos funcionales cargados negativamente (por ejemplo -NH₂); adicionalmente, la pared celular contiene polisacáridos que también proporcionan grupos amino y carboxilo, así como también sulfato.

Así, es como los iones metálicos logran traspasar la pared celular de la microalga mediante procesos de adsorción física, intercambio iónico, quimisorción, atrapamiento en la red estructural de polisacáridos y difusión a través de la pared celular y membrana¹⁵, sin embargo, el proceso de incorporación a la biomasa microalgal se completa cuando ya los iones metálicos se encuentran dentro de la célula y aquí es donde ocurre la segunda etapa, un proceso dependiente del metabolismo donde los iones metálicos se transportan a través de la membrana celular para luego acumularse dentro de la célula, así, se unen compuestos

¹² ÁLVAREZ, P. Optimización de la producción de microalgas con elevado contenido lipídico. Universidad de Cádiz. (2014)

¹³ TRAVIESO, L., BENITEZ, F., SÁNCHEZ, E., PELLÓN, A. Equipo y método para la Remoción de Metales Pesados y Nutrientes Mediante Microalgas Inmovilizadas. (2003). Patente CU 22948

¹⁴ METHA, S., GAUR, J. Uso de algas para eliminar iones de metales pesados de aguas residuales: progreso y perspectivas. Críticas en biotecnología. [en línea] <<https://doi.org/10.1080/07388550500248571>> [citado el 19 de abril de 2018].

¹⁵ MONTEIRO, C., CASTRO, P., MALCATA, X. 2012. Absorción de metal por microalgas: mecanismos subyacentes y aplicaciones prácticas. Biotecnología. Prog. 28 (2), 299–311.

intracelulares y/o contención de orgánulos. Ésta última fase del proceso es un proceso de absorción el cual sólo está restringido a procesos con células vivas¹⁶.

1.3 TOXICIDAD DEL CROMO

Existen diversos compuestos formados en distintos estados de oxidación del cromo, pero los más conocidos y aplicados son los estados de valencia II (cromosos) el cual es denominado como básico, III (crómicos) es anfótero y VI (cromatos) considerado como ácido¹⁷.

Los compuestos de cromo con estado de oxidación 6 (Cr VI), son los que tienen mayor impacto ambiental y los más dañinos para el hombre en concentraciones elevadas, donde la OSHA ha establecido límites legales en el aire del trabajo de 0.005 mg/m³ para cromo (VI), 0.5 mg/m³ para cromo (III) y 1.0 mg/m³ para cromo (0) como promedios durante una jornada diaria de 8 horas¹⁸ debido a su alta toxicidad y entre los más importantes están: el dicromato sódico (Na₂Cr₂O₇), el dicromato potásico (K₂Cr₂O₇) y el trióxido de cromo (CrO₃). La exposición ocupacional a estos compuestos está relacionada con un mayor riesgo de cáncer de pulmón, cáncer de seno paranasal y de cavidad nasal¹⁹.

La toxicidad del cromo es el grado en el que este elemento causa daño, altamente relacionado con los tres estados de valencia que posee, siendo el más tóxico el de valencia 6; le sigue el de valencia 3 y finalmente está el de valencia 2 que no va a generar mucho daño²⁰.

En Colombia, la exposición al cromo es principalmente de origen industrial. Las principales actividades de riesgo relacionadas con la exposición a cromo son el refinado de cromo, la industria de cuero y calzado, industria cementera, artes gráficas, entre otras²¹. Una de las fuentes frecuentes de exposición al cromo son

¹⁶ K. SURESH KUMAR., HANS-UWE DAHMS., EUN-JI WON., JAE-SEONG LEE., KYUNG-HOON SHIN. 2014. p. 12-13 Microalgas – Una herramienta prometedora para la remediación de metales pesados.

¹⁷ SUNDARAM, S., RAGHAVAN, P. Reactivos de cromo IV: aplicaciones sintéticas. Obtenido de Propiedades del cromo (2011)

¹⁸ AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. Resúmenes de Salud Pública - Cromo (Chromium). [en línea] <[en línea] <<https://doi.org/10.1080/07388550500248571>> [citado el 19 de abril de 2018].> [citado el 04 de julio de 2018].

¹⁹ INSTITUTO NACIONAL DE CANCER. Compuestos de cromo hexavalente. [en línea] <<https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/cromo>> [citado el 25 de junio de 2018].

²⁰ SUNDARAM, S., RAGHAVAN, P. Reactivos de cromo IV: aplicaciones sintéticas. Obtenido de Propiedades del cromo (2011)

²¹ TÉLLEZ, J., CARVAJAL, M., GAITÁN, A. Aspectos Toxicológicos Relacionados con la Utilización del Cromo en el proceso Productivo de Curtiembres. Revista Facultad de Medicina Universidad Nacional de Colombia; 2004; 50-61.

las fábricas de curtiembres, que comprenden la manipulación de pieles animales y su modificación con fines industriales. Se calcula que en el país existen 800 empresas con esta finalidad²².

El 60 % se ubican en Bogotá y su sabana y de estas, el 90 % en la localidad de Tunjuelito, principalmente en el barrio San Benito donde se concentra el 20 % de la actividad fabril de Tunjuelito²³. El río Tunjuelito recibe 138 vertimientos, con un promedio de 6,7 vertimientos por kilómetro; de la carga de metales pesados arrojada al río, un 79,81% corresponde a Cr, 19,19% zinc y el resto de metales 1%²⁴.

1.4 SCENEDESMUS DIMORPHUS

Es una microalga verde unicelular de agua dulce, tiene forma de óvalo puntiagudo de aproximadamente unos 10 μm de tamaño (ver figura 1) y categorizada como un alga pesada, esto quiere decir que presenta una pared celular celulósica rígida²⁵, lo que facilita su sedimentación.

Scenedesmus dimorphus tiene un contenido de lípidos de 16 - 40%, siendo una de las especies más utilizadas para la obtención de aceite en la producción de biodiesel. Uno de los problemas con esta microalga es que es muy pesada debido al grosor de sus paredes, y forma sedimentos gruesos si no se mantiene en constante agitación²⁶.

Esta especie de microalga constituye una de las materias primas con mejores propiedades para la extracción de aceite, debido a que tiene un rendimiento de aceite mucho mayor comparado con otros cultivos convencionales.

²² Ibid.

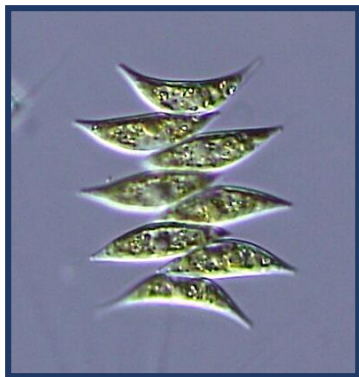
²³ Alcaldía Mayor de Bogotá. Diagnostico Local con Participación Social: Localidad Sexta Tunjuelito. Bogotá, D.C. 2010.

²⁴ Colombia. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Departamento Técnico Administrativo Medio Ambiente (DAMA). VI Fase de Seguimiento de Efluentes Industriales y Corrientes Superficiales de Bogotá D.C. Bogotá: Imprenta del IDEAM, s.f. 91P. ISBN 958-8067-10-3. 2005.

²⁵ GÓMEZ LUNA, L. M. Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. [en línea] <https://www.researchgate.net/publication/268424391_MICROALGAS_ASPECTOS_ECOLOGICOS_Y_BIOTECNOLOGICOS> [citado el 22 de mayo de 2018].

²⁶ MERCADO TUPIÑO, Estefanía. Cultivo de la microalga *Scenedesmus Obliquus* var. *Dimorphus* (TURPIN) para la obtención de biomasa y lípidos. [en línea] <http://cybertesis.urp.edu.pe/bitstream/urp/1095/1/ECOLOG%C3%8DA%20Y%20GESTI%C3%93N%20AMBIENTAL_ESTEFANIA%20MERCADO%20TUPI%C3%91O_2016.pdf> [citado el 26 de febrero de 2018].

Figura 1. *Scenedesmus dimorphus*



Fuente: Wikipedia. *Scenedesmus dimorphus*. [en línea] <https://en.wikipedia.org/wiki/Scenedesmus_dimorphus> [citado el 08 de mayo de 2018]

1.5 CONDICIONES PARA LAS MICROALGAS EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

Es importante tener en cuenta condiciones de cultivo que permitan el crecimiento de las microalgas, dado que la remoción de contaminantes dependerá de la cantidad de biomasa disponible para degradarlos²⁷.

1.5.1 La luz. Las microalgas son fotoautótrofas, es decir que se encargan de convertir la luz en energía metabólica y sus períodos de exposición luminosa pueden ser continuos o discontinuos.²⁸ Puede ser dividida en dos partes principales; la intensidad lumínica, que se define como la concentración de luz que afecta un volumen determinado de medio de cultivo dentro del fotobiorreactor y la longitud de onda que describe el color de luz utilizada para el cultivo. Un diseño óptimo debe maximizar la cantidad de luz transmitida al cultivo, evitando el exceso por fotoinhibición²⁹. Por esto, la regulación lumínica en el fotobiorreactor se rige por la relación superficie (área)-volumen, que en el caso de los fotobiorreactores tubulares que son los más empleados, está determinada por los diámetros del fotobiorreactor³⁰.

²⁷ VALLE, G. Utilización de microalgas para la remoción de Cadmio y Zinc de efluentes de aguas residuales urbanas. Maestría. Centro de investigación científica y de educación superior de ensenada. (2007) p. 130,131

²⁸ SIERRA, J. A., FONSECA, S., SANDOVAL, J. A., RUBIO, D. (2012). Diseño de un Fotobiorreactor Airlift a escala banco.

²⁹ RUBIO, D., BARRERA, N., FONSECA, L., JAIMES, C. Aspectos teóricos de la extracción de carotenoides a partir de microalgas. Universidad de América. (2017).

³⁰ GUTIERREZ, L., OCAMPO, M., MONTOYA, S., SANCHEZ, Ó. Efecto de tres tipos de luz sobre el crecimiento de microalgas de *Scenedesmus Sp*. Universidad Nacional de Colombia. (2016).

Sin embargo, para fotobiorreactores de panel plano, por su geometría la luz llegará más distribuida al cultivo y por tanto la incidencia de este factor aumentará el crecimiento de la microalga.

1.5.2 Temperatura. Para las microalgas la temperatura óptima oscila entre los 15°C y 20°C, aunque existen unas que pueden soportar temperaturas mayores (a más de 28°C) ³¹. Variaciones en la temperatura, afectan ampliamente la composición y respiración celular, así como los ciclos de fotosíntesis, de los cuales dependen las reacciones enzimáticas y biológicas del proceso.

1.5.3 Niveles de aireación. Es necesario homogeneizar el cultivo para evitar la sedimentación de las microalgas, manteniendo aireado el recipiente donde están contenidos y tener la cantidad correcta de cada uno de los nutrientes, puesto que de esta homogenización depende la distribución equitativa de la luz en el cultivo, recordando así la incidencia de esta última en el crecimiento de la biomasa.

1.5.4 Rango de pH. La respuesta de las microalgas al pH varía ampliamente debido a que este factor determina la solubilidad del dióxido de carbono y de los minerales en los cultivos. El CO₂ puede ser empleado para controlar el pH del cultivo, ya que añadiendo CO₂ se acidifica el medio de cultivo, mientras que el consumo de nitratos por parte de las microalgas causa alcalización del medio³².

1.6 CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA

La determinación de la producción de biomasa es un proceso derivado de los bioprocesos que tiene gran relevancia, puesto que por medio de éste se da a conocer la eficiencia que tuvo el experimento por medios cuantitativos y así mismo la asimilación de los nutrientes, producción entre otros³³. Existen numerosos métodos de cuantificación, tal como, espectrofotometría, clorofilas y conteos.

1.6.1 Conteos. Es un método que hace uso de una cámara (Neubauer, Thoma, Burkner, etc.) un microscopio el cual permitirá el conteo celular en la cuadrícula de la cámara³⁴ (ver figura 2). Este conteo se puede hacer de varias maneras: recuadro central, recuento de 5 cuadros grandes (central y cuatro esquineros) ver figura 3 y recuento en forma de zig-zag si se tiene una alta concentración celular, ver figura 4.

³¹ TORRENTERA, L. (1989). La producción de alimento vivo y su importancia en acuicultura. Una diagnosis

³² DÍAZ, V., ORDOÑEZ, C. Evaluación de pH y la agitación del medio más adecuada para el crecimiento de *Dunaliella salina* en condiciones laboratorio. Pontificia Universidad Javeriana. (2006) p.25

³³ ARNÁIZ, C., ISAC, L., LEBARTO, J. Determinación de la biomasa en procesos biológicos. En: Grupo de tratamiento de aguas residuales. Escuela Universitaria Politécnica. Sevilla. (2000) p 45.

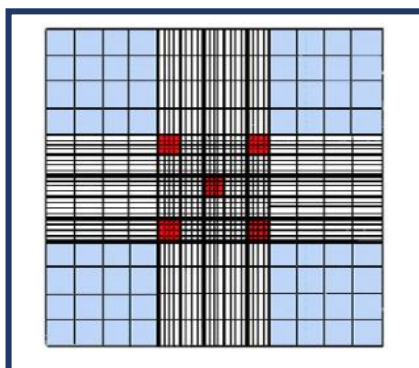
³⁴ ARNÁIZ, C., Op. Cit., p. 46.

Figura 2. Uso de microscopio binocular



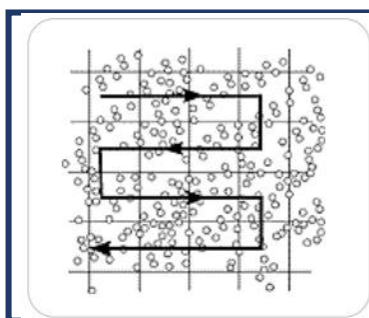
Fuente: elaboración propia

Figura 3. Recuento de 5 cuadros de la rejilla central de la cámara de Neubauer



Fuente: URIEL. Cámara de Neubauer. [en línea] <http://uriel-93.over-blog.com/article-29526447.html> [citado el 26 de febrero de 2018].

Figura 4. Recuento con alta concentración celular



Fuente: CELEROMICS. Conteo Celular con Hematocitómetro. Uso Elemental del Hematocitómetro. p 5. [en línea] <<http://www.celeromics.com/es/resources/docs/Articles/Conteo-Camara-Neubauer.pdf>> [citado el 26 de febrero de 2018].

La cantidad de muestra que debe agregarse en la cámara de Neubauer es de 10 μL ³⁵.

Este método es el más utilizado en la actualidad debido a la facilidad que presenta; sin embargo, una de las grandes desventajas es que al ser la muestra poco representativa puede presentar errores de hasta un 30%, de igual forma, en la cantidad de volumen suministrado³⁶, se pueden presentar errores al momento de realizar el conteo por parte del observador.

1.6.2 Curva de crecimiento. La curva de crecimiento básicamente muestra el incremento y caída de una población de microorganismos³⁷. La finalidad de una curva de crecimiento, es ilustrar la variación de la concentración celular (como peso seco o total de población) con respecto al tiempo³⁸. Para la estimación exacta de los parámetros de una curva de crecimiento, son importantes el número y la calidad de las observaciones (recuentos) hechas³⁹.

La curva de crecimiento de un cultivo de microorganismos puede ser subdividida en cuatro partes distintas denominadas fase de adaptación, fase exponencial, fase estacionaria y fase de muerte.

1.6.2.1 Fase de adaptación. Es el período de tiempo durante el que el microorganismo se adapta a las condiciones del medio fresco sobre el que se ha sembrado⁴⁰, antes de iniciar su crecimiento.

1.6.2.2 Fase exponencial. La masa de microorganismos crece hasta que se agotan los nutrientes y se acumulan sustancias tóxicas que inhiben el crecimiento⁴¹.

³⁵ BASTIDAS, O. Conteo celular con Hematocitómetro. Uso elemental del Hematocitómetro. Nota técnica - Célula de cámara de Neubauer. Celeromics. [en línea] <<http://www.celeromics.com.es/resources/docs/articles/conteo-camara-neubauer.pdf>> [citado el 26 de febrero de 2018].

³⁶ Ibid., p.6

³⁷ CHEREMISINOFF, N. Biotecnología para el tratamiento de desechos y aguas residuales. William Andrew Publishing/Noyes, 1997. [en línea] <https://app.knovel.com.ez.uamerica.edu.co/web/toc.v/cid:kpBWWT0002/viewerType:toc/root_slug:biotechnology-waste-wastewater/url_slug:kt003VLPP5> [citado el 26 de febrero de 2018].

³⁸ SCHASCHKE, C. Diccionario de Ingeniería Química. Oxford University Press, 2014. [en línea] <https://app.knovel.com.ez.uamerica.edu.co/web/toc.v/cid:kpDCE00021/viewerType:toc/root_slug:dictionary-chemical-engineering/url_slug:kt00TW5UY3?b-q=growth_curve&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default> [citado el 26 de febrero de 2018].

³⁹ BRATCHELL, N., GIBSON, A., TRUMAN, M., KELLY, T., ROBERTS, T. Prediciendo el comportamiento microbiano: las consecuencias de la cantidad de datos. Revista Internacional de microbiología de los alimentos. 1989. p 47-58.

⁴⁰ Ciclo celular y crecimiento [en línea] <<https://www.ugr.es/~eianez/Microbiologia/12crecimiento.htm>> [citado el 26 de febrero de 2018].

⁴¹ RIVERÓN, E., RAMÍREZ, N., HERRERA, D., BARRERAS, G., ZAYAS, A., REQUEIRO, A. Estación de trabajo para el estudio de la cinética de crecimiento de Escherichia coli mediante el método de turbidez. Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 43, No. 2, mayo-agosto, 2012. p 2.

En esta fase, hay un aumento en la densidad celular del cultivo y una mayor remoción de contaminantes, esto se debe a la asimilación del medio por parte de los microorganismos.

1.6.2.3 Fase estacionaria. Se caracteriza por un cese del crecimiento poblacional debido a la compensación de la formación y muerte de células⁴². En esta fase se equilibran el número de células nuevas con el número de células que mueren⁴³.

1.6.2.4 Fase de muerte. Es una fase de decadencia reflejada en una línea recta y exponencial, en el cual la tasa de mortalidad supera la de crecimiento debido a la ausencia de sustrato⁴⁴.

1.6.3 Velocidad específica de crecimiento. Es la relación de crecimiento de la célula en función de los nutrientes del medio⁴⁵. Durante la fase exponencial, la velocidad específica de crecimiento es constante, por lo que se obtiene un estado estable.

1.7 FOTOBIOREACTOR DE PANEL PLANO

Este tipo de diseño permite una mejor trayectoria incidente de la luz en el cultivo facilitando los ciclos de luz-oscuridad, aumentando la producción de biomasa y otros compuestos en las microalgas⁴⁶ como se observa en la figura 5.

Algunas de sus ventajas son una mayor relación entre el volumen cultivado y el área ocupada, una menor acumulación de O₂ disuelto, alta eficiencia fotosintética, práctico para el empleo de células inmovilizadas, altas productividades de biomasa, relativamente barato y de fácil limpieza. Sus principales desventajas son dificultad para el control de temperatura, el escalado requiere muchos compartimentos y materiales de soporte, crecimiento celular en las paredes y posible estrés hidrodinámico en algunas microalgas⁴⁷.

⁴² *Ibíd.* p 2.

⁴³ BENINTENDE, S., SANCHEZ, C. Crecimiento bacteriano. [en línea] <http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/microbiologia/unidad_3_crecimiento_bacteriano.pdf> [citado el 26 de febrero de 2018].

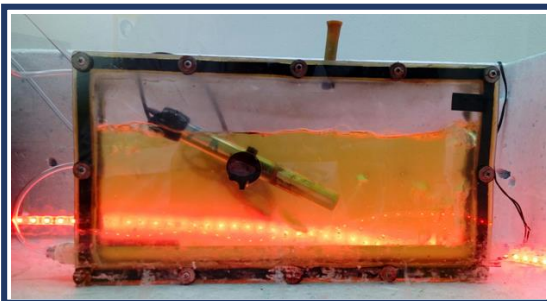
⁴⁴ SOSA, J., VASQUEZ, P. Evaluación del potencial de un residuo proveniente de la industria panelera como fuente de carbono para la producción de biomasa microalgal. Fundación Universidad de América. (2017) p 40.

⁴⁵ NOLASCO TERRÓN, E. Y. Cinética de crecimiento celular: Ecuación de Monod. [en línea] <<https://es.slideshare.net/edya69/ecuacin-de-monod-copia>> [citado el 22 de mayo de 2018].

⁴⁶ BENAVENTE, R., MONTAÑEZ, J., AGUILAR, C., VALDIVIA, B. Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Revista científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. (2012) p 8.

⁴⁷ SERRANO BERMUDEZ, L. M. Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel. Universidad Nacional de Colombia. (2012) p 29.

Figura 5. Fotobiorreactor de panel plano



Fuente: elaboración propia

1.8 FOTOBIORREACTOR ADAPTADO

Este reactor de vidrio de geometría cilíndrica tiene una capacidad de 4 L y cuenta con tres aberturas en la tapa, dos de ellas para tubos de PVC que en su interior contienen mangueras que permiten el paso de aire desde la bomba hasta el cultivo y la otra abertura corresponde a una pequeña manguera, que contiene en la parte superior una mota de algodón que evita el ingreso de polvo o microorganismos al interior del cultivo, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Fotobiorreactor adaptado



Fuente: elaboración propia

El fotobiorreactor adaptado se toma como un control de lo que usualmente se hace en investigaciones realizadas, con la finalidad de analizar el comportamiento de la cepa microalgal en este recipiente con respecto al presentado en el fotobiorreactor de panel plano.

1.9 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE

Las técnicas colorimétricas se basan en la medida de la absorción de radiación en la zona visible por sustancias coloreadas⁴⁸ y suministran información cualitativa y cuantitativa sobre sustancias en disolución.

Para llevar a cabo las mediciones colorimétricas es necesario tomar como punto de comparación la llamada curva espectral codificada, que permite asignar valores numéricos a la respuesta de estímulos de colores. Una vez asignados los valores se hace una suma de los mismos y se obtiene la cuantificación del o los colores⁴⁹.

El instrumento utilizado es el colorímetro, que está diseñado para dirigir un haz de luz paralela monocromática a través de una muestra líquida y medir la intensidad del haz luminoso saliente.

Para determinar la concentración de cromo hexavalente en una muestra de agua se emplea el método colorimétrico. El método colorimétrico se basa en la reacción del cromo hexavalente con 1,5-difenilcarbazida en medio ácido, lo que produce la formación de un compuesto desconocido de color rojo violeta. Éste puede ser medido espectrofotométricamente a una longitud de onda de 540 nm y la absorbancia es proporcional a la concentración de cromo en la muestra⁵⁰.

Para determinar cromo total, la muestra debe ser sometida a digestión ácida y oxidación con permanganato de potasio, previo a la reacción con la difenilcarbazida⁵¹.

⁴⁸ MARTINEZ, O., PÉREZ, M., NUÑO, F. Colorimetría. [en línea] <<https://es.slideshare.net/Marlenpmtz/colorimetria-61067922>> [citado el 17 de mayo de 2018].

⁴⁹ *Ibíd.*

⁵⁰ SEVERICHE, C., CASTILLO, M., ACEVEDO, R. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas.2013. p 69. [en línea] <<http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>> [citado el 17 de mayo de 2018].

⁵¹ *Ibíd.*

2. METODOLOGÍA

El trabajo de grado se desarrolla en 3 etapas como se muestra en la figura 5; en la primera se lleva a cabo la revisión bibliográfica para obtener el rango de concentraciones de cromo a trabajar, según artículos de revistas científicas y tesis que hayan realizado en su trabajo producción de biomasa microalgal a partir de agua con diferentes concentraciones de cromo.

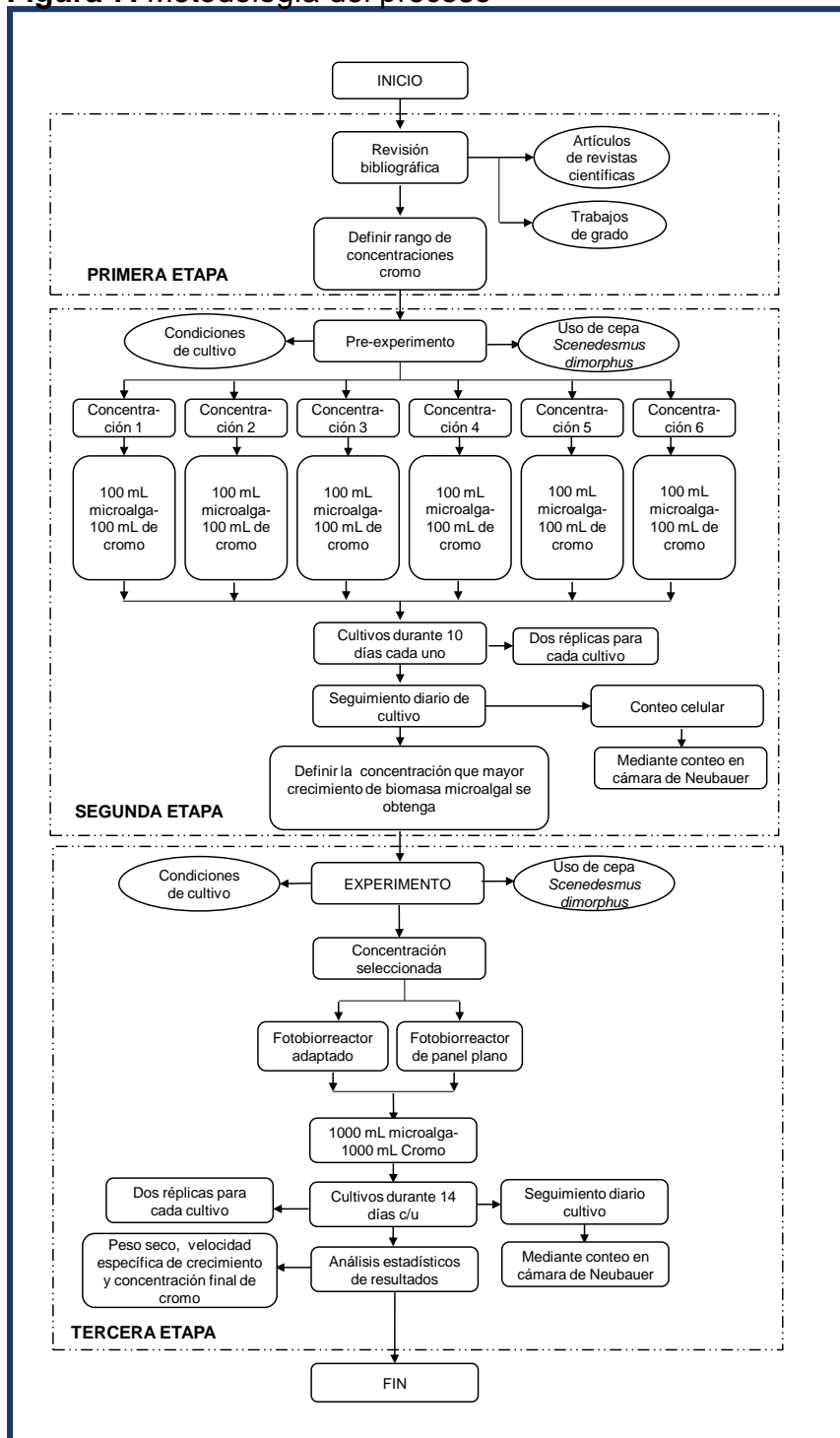
En la segunda etapa se inicia el pre experimento poniendo en marcha los cultivos en fotobiorreactores adaptados, donde se evalúa la incidencia en el crecimiento de la cepa *Scenedesmus dimorphus* de la forma química del cromo y las diferentes concentraciones elegidas dentro del rango establecido en la revisión bibliográfica. Se dejan los cultivos durante 10 días cada uno, haciendo seguimiento diario de su concentración celular. De aquí se define qué concentración de cromo obtuvo mayor crecimiento de biomasa al finalizar los 10 días, y esta concentración es la que se implementa en el experimento.

La tercera etapa es la ejecución del experimento, en la cual se mantienen las condiciones del cultivo de la segunda etapa y se trabaja con el fotobiorreactor de panel plano de 2 litros de volumen y un fotobiorreactor adaptado de 2 litros de volumen, evaluando en cual se genera mayor cantidad de biomasa microalgal en un medio de cultivo con la concentración de cromato seleccionada.

Para el desarrollo de la segunda y tercera etapa, se elabora un agua sintética, la cual es un agua que simula las condiciones de un agua real y es evaluada; en este caso el agua sintética se prepara con agua destilada y un compuesto químico que contenga cromo, con la finalidad de obtener las concentraciones establecidas.

Para la puesta en marcha del fotobiorreactor de panel plano, se debe ver el protocolo del Anexo A.

Figura 7. Metodología del proceso



Fuente: elaboración propia

2.1 PRIMERA ETAPA

Consiste en establecer el rango de concentraciones de cromo en las muestras a analizar, mediante una revisión bibliográfica.

2.1.1 Revisión bibliográfica. Para definir el rango de concentraciones de cromo y forma química del mismo que se trabajará en el experimento, se realiza una revisión bibliográfica de artículos y/o tesis que hayan realizado tratamiento de remoción de cromo de aguas con alguna cepa de microalga verde de la especie *Chlorella* o *Scenedesmus*.

Dentro de los documentos encontrados, la información se agrupa y organiza de acuerdo con los siguientes criterios:

- **Tipo de agua.** Se tiene en cuenta el tipo de agua que se utilizó para el desarrollo del experimento.
- **Concentración de cromo.** Se consideraron las concentraciones mínima y máxima de cromo trabajadas en las investigaciones para establecer el rango en el que se iba a realizar la pre-experimentación.
- **Volumen total del cultivo.** Se tiene en consideración este criterio para tener una referencia sobre el volumen a utilizar en el experimento.
- **Escala.** Se determina el tipo de escala en el que se realizó la investigación, ya sea laboratorio o piloto, para delimitar el proyecto y no tomar la información de escala piloto porque se desajustan los resultados obtenidos en el proyecto.
- **Especie.** Se tiene en cuenta la especie de microalga verde en la remoción de cromo de aguas.
- **Estados de oxidación del Cr.** Se define el estado de oxidación para su posterior selección en el desarrollo del pre-experimento.

2.2 SEGUNDA ETAPA

En esta etapa se fijan las condiciones del cultivo microalgal a través de trabajos realizados en la línea de investigación y se lleva a cabo la pre-experimentación dentro del rango de concentraciones de cromo con la finalidad de escoger el valor de la concentración y forma química del Cromo encontrados en la revisión bibliográfica que arroje mejores resultados en cuanto a producción de biomasa para posteriormente realizar la experimentación.

2.2.1 Pre-Selección teórica de la forma química del cromo. Como se expresa en el marco teórico (1.2) los distintos estados de oxidación del cromo son II (cromoso), III (crómico) y VI (cromato). Se evalúa en los documentos encontrados en la revisión bibliográfica cuáles son las formas químicas más estudiadas en tratamiento con microalgas y posteriormente se realiza el pre experimento para determinar cuál tiene mejores resultados en crecimiento microalgal.

2.2.2 Cepa microalgal. Se usa la cepa de la microalga *Scenedesmus dimorphus* para el desarrollo de este proyecto, debido a que en el grupo de investigación esta especie no ha sido utilizada en ningún estudio y se encuentra disponible en la Universidad de América donde se realizará la investigación. Esta cepa fue suministrada por el grupo de investigación de biotecnología con microalgas de la Fundación Universidad de América (BIOTECFUA).

2.2.3 Condiciones del cultivo. Las condiciones de cultivo para la microalga *Scenedesmus dimorphus* han sido determinadas por trabajos de investigación de la línea; estas son de gran importancia para asegurar el crecimiento de la cepa microalgal.

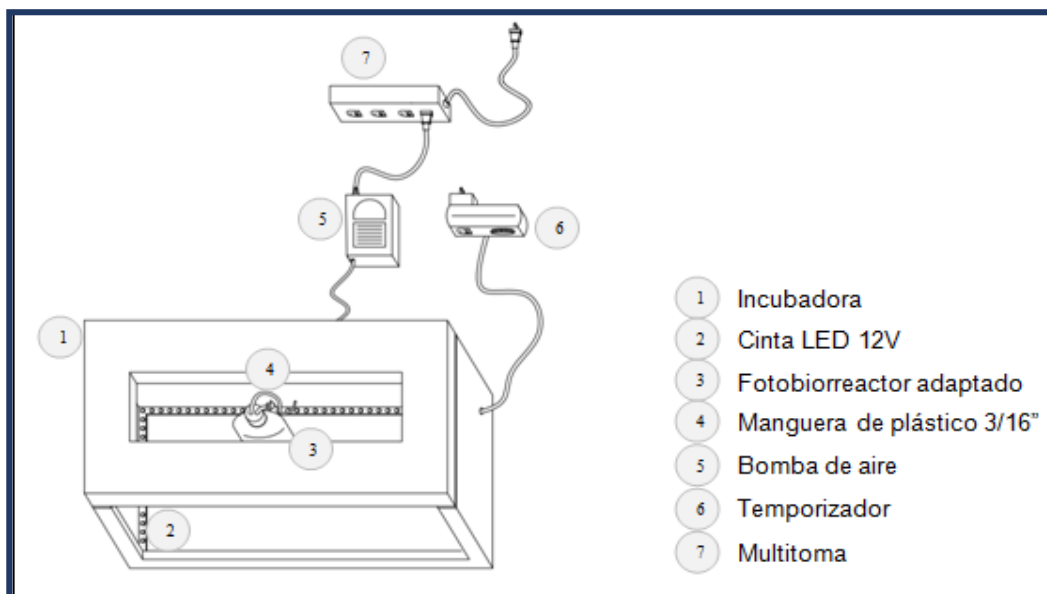
2.2.3.1 Iluminación. Al interior de la incubadora, en el borde de la base inferior, se instala una cinta Led 12V de luz roja, para proporcionar luz y calor al cultivo, la cual se encuentra conectada a un temporizador análogo que garantiza fotoperiodos de 12 horas luz / 12 horas oscuridad.

2.2.3.2 Agitación. Se da paso a una manguera que procede de las bombas de aire para acuario y atraviesa cada tapa de los fotobiorreactores, con el fin de proporcionarle aireación al cultivo.

2.2.3.3 Nutrientes. Se emplea fertilizante agrícola Foliagro y se prepara con una concentración de 0.2% V/V, esto es 2 mL de fertilizante por 1000 mL de agua destilada. La composición del fertilizante se puede apreciar en el Anexo B.

La integración del sistema de microalgas se puede observar en la figura 8.

Figura 8. Integración del sistema de cultivo



Fuente: elaboración propia

En la figura 8, se observa que el sistema de cultivo está conformado por los fotobiorreactores adaptados con capacidad de 400 mL que se dispusieron en una incubadora de poliestireno expandido (83 x 38 x 27 cm), la cual presenta iluminación roja en su interior mediante una cinta LED 12V de luz roja, con un fotoperiodo de 12 horas luz, 12 horas oscuridad, que se controló mediante un temporizador análogo de marca Completel (TS-WU3).

Para la agitación, se utilizaron bombas de aire para acuario marca Jeneca, modelo AP-9802, que estaban conectadas hasta medio por medio de una manguera de referencia 3/16", con el fin de generar una entrada de aire y agitación, de igual forma el recipiente tenía adaptada una manguera de salida para la desgasificación, con un filtro de aire hecho con algodón para evitar la contaminación externa al medio.

2.2.4 Producción de inóculo microalgal.

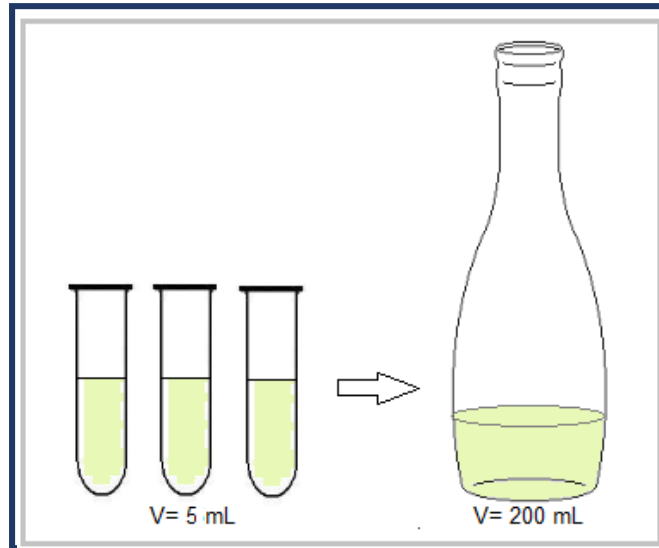
2.2.4.1 Preparación del inóculo microalgal. La microalga *Scenedesmus dimorphus* fue suministrada por el grupo de investigación de biotecnología con microalgas de la Fundación Universidad de América (BIOTECFUA).

La cepa se pasa de un medio sólido que se encuentra en una placa de petri, la cual permite el crecimiento del microorganismo en condiciones controladas) a medio

líquido en 11 tubos de ensayo, bajo técnicas asépticas⁵²; en el Anexo C se encuentra dicha técnica.

Posterior a 2 meses de crecimiento, cuando el cultivo toma un color verde claro, se pasan tres tubos de ensayo a recipientes de vidrio de 1 L previamente esterilizados, con fertilizante foliar para obtener un volumen de 200 mL de biomasa. Ver figura 9.

Figura 9. Preparación del inóculo



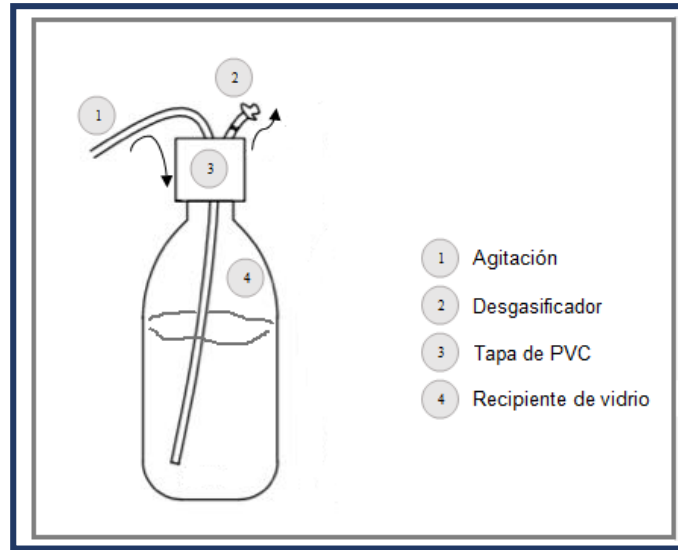
Fuente: elaboración propia

2.2.5 Pre-Experimento. Para el desarrollo del pre-experimento, se usan seis fotobiorreactores adaptados diferentes a los usados en el experimento (en el interior hay una manguera para la agitación) con capacidad de 400 mL cada uno, para cada una de las concentraciones definidas a partir de la revisión bibliografía, es decir, un rango de [1- 300] mg/L. Se toman 6 concentraciones [50, 100, 150, 200, 250, 300] mg/L (ver figura 10), para los dos estados de oxidación del cromo escogidos (III y VI); en los fotobiorreactores se maneja un volumen de trabajo de 200 mL, 100 mL de inóculo microalgal y los 100 mL restantes corresponden a la concentración de cromo diluida en agua destilada.

Para preparar las disoluciones, se pone una cantidad de Cromo (III o VI) en un vidrio de reloj, se pesa en una balanza analítica hasta obtener el peso deseado, se vierte en un vaso de precipitado con 100 mL de agua destilada y se agita hasta que el cromo se diluya en su totalidad.

⁵² Módulo Técnicas asépticas y bioseguridad. [en línea] <<https://es.scribd.com/doc/89579604/Modulo-Tecnicas-Asepticas-y-Bioseguridad>> p 12-14. [citado el 29 de junio de 2018].

Figura 10. Montaje fotobiorreactor adaptado pre-experimento



Fuente: elaboración propia

2.2.5.1 Cuantificación de la biomasa. La cuantificación de la biomasa se expresa en concentración de biomasa de microalgas por medio de conteos, los cuales se realizan para las 6 concentraciones durante 10 días.

- **Curvas de crecimiento.** La determinación de la concentración celular se realiza mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Concentración celular en células por mililitro [cel/mL]

$$\text{Concentración} \left(\frac{\text{cel}}{\text{mL}} \right) = \# \text{células totales (5C)} * \text{Factor de Dilución} * 50,000$$

Fuente: Murcia, L., Parra, M. (2017). Producción de proteínas a partir de la microalga *Chlorella vulgaris* enriqueciendo el medio de cultivo con fuentes de nitrógeno. Universidad de América.

Con los datos obtenidos y utilizando Excel, se construyen las curvas del crecimiento celular, siendo la variable independiente el tiempo en días y la variable dependiente la concentración celular.

2.2.5.2 Velocidad específica de crecimiento (μ). Para determinar el mejor comportamiento en cuanto a producción de biomasa microalgas respecto al tiempo de cultivo de cada una de las concentraciones es posible calcular la velocidad específica de crecimiento (μ) mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Cálculo de velocidad específica de crecimiento (μ)

$$\mu = \frac{\ln \left(\frac{X_2}{X_1} \right)}{(t_2 - t_1)}$$

Fuente: Arredondo, B., Voltolina, D. (2007). Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Donde:

X_1 = Concentración inicial

X_2 = Concentración final de la fase exponencial

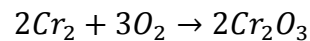
t_1 = Día de la concentración inicial de la fase exponencial

t_2 = Día de la concentración final de la fase exponencial

2.2.5.3 Pre-Experimento No. 1. Este pre-experimento se realiza con la finalidad de corroborar la capacidad que tienen las microalgas para adaptarse y crecer en un medio de cultivo con Óxido de cromo (III).

La reacción química para el óxido de cromo se ve reflejada en la Reacción 1.

Reacción 1. Reacción química óxido de cromo (III)



Dado que el volumen de agua destilada será de 100 mL (0,1 L) donde se va a diluir el Cr_2O_3 es posible calcular la cantidad de Cr_2 necesaria para completar las diferentes concentraciones por medio de la ecuación 3.

Ecuación 3. Concentración de cromo

$$\text{Concentración} \frac{mg}{L} = \frac{\text{Cantidad de } Cr_2(mg)}{\text{Volumen agua destilada}(L)}$$

Así, para cada una de las concentraciones es posible hallar los mg de Cr que se deben agregar al volumen agua destilada para obtener la concentración deseada. para la primera concentración:

$$50 \frac{mg}{L} (\text{Cromo}) = \frac{\text{Cantidad de } Cr_2(mg)}{0,1 (L)}$$

$$\text{Cantidad de } Cr_2(mg) = 50 \frac{mg}{L} (Cr) * 0,1(L)$$

$$\text{Cantidad de } Cr_2(mg) = 5 mg$$

Teniendo la cantidad de mg de Cr es posible hallar la cantidad total de Cr₂O₃ de forma estequiométrica, los pesos moleculares de cada compuesto y de acuerdo con la reacción 1.

$$5 \text{ mg Cr}_2 \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol Cr}_2}{104 \text{ g}} \times \frac{2 \text{ mol Cr}_2\text{O}_3}{2 \text{ mol Cr}_2} \times \frac{152 \text{ g Cr}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol Cr}_2\text{O}_3} \times \frac{1000 \text{ mg Cr}_2\text{O}_3}{1 \text{ g Cr}_2\text{O}_3} =$$

$$= 7,307 \text{ mg Cr}_2\text{O}_3$$

Así, 7,307 mg de Cr₂O₃ es la cantidad a agregar en 100 mL de agua destilada para obtener la concentración de 50 mg/L de Cromo.

Se realiza el mismo procedimiento para las demás concentraciones, donde los resultados se ven reflejados en la Tabla 1.

Tabla 1. Relaciones de volumen para el montaje del Pre-experimento 1

Concentración Cromo [mg/L]	Cr ₂ O ₃ [mg]	Microalga [mL]	Agua destilada [mL]	Volumen total de trabajo [mL]
50	7,307	100	100	200
100	14,615	100	100	200
150	21,923	100	100	200
200	29,230	100	100	200
250	36,538	100	100	200
300	43,846	100	100	200

Fuente: elaboración propia

2.2.5.4 Pre-experimento No. 2. En este pre-experimento se utiliza Dicromato de potasio como medio de cultivo en las muestras a analizar y la selección de las proporciones de este compuesto en el medio se muestra en la Tabla 4.

La reacción química para el Dicromato de potasio se ve reflejada en la Reacción 2.

Reacción 2. Reacción química Dicromato de potasio



Dado que el volumen de agua destilada será de 100 mL (0,1 L) donde se va a diluir el K₂Cr₂O₇ es posible calcular la cantidad de Cr₂ necesaria para completar las diferentes concentraciones por medio de la ecuación 3.

El peso molecular del $H_2Cr_2O_7$ es de 218 g/mol, lo que corresponde a 104 g/mol de Cr_2 . La proporción de Cr_2 en el $H_2Cr_2O_7$ es del 47,706%. Así, conociendo la cantidad necesaria de Cr_2 para cada concentración es posible hallar cada una de las cantidades de $H_2Cr_2O_7$ necesaria.

Teniendo la cantidad de mg de $H_2Cr_2O_7$ es posible hallar la cantidad total de Cr_2O_3 de forma estequiométrica, los pesos moleculares de cada compuesto y de acuerdo con la reacción 2.

$$5 \text{ mg } Cr_2 \times \frac{100\% \text{ } H_2Cr_2O_7}{47,706\% \text{ } Cr_2} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol } H_2Cr_2O_7}{218 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ mol } K_2Cr_2O_7}{1 \text{ mol } H_2Cr_2O_7} \times \frac{294,185 \text{ g } K_2Cr_2O_7}{1 \text{ mol } K_2Cr_2O_7} \times \frac{1000 \text{ mg } K_2Cr_2O_7}{1 \text{ g } K_2Cr_2O_7} = 14,144 \text{ mg } K_2Cr_2O_7$$

Así, 14,144 mg de $K_2Cr_2O_7$ es la cantidad a agregar en 100 mL de agua destilada para obtener la concentración de 50 mg/L de Cromo.

Se realiza el mismo procedimiento para las demás concentraciones, donde los resultados se ven reflejados en la Tabla 2.

Tabla 2. Relaciones de volumen para el montaje del Pre-experimento 2

Concentración de cromo [mg/L]	$K_2Cr_2O_7$ [mg]	Microalga [mL]	Agua destilada [mL]	Volumen total de trabajo [mL]
50	14,144	100	100	200
100	28,287	100	100	200
150	42,431	100	100	200
200	56,574	100	100	200
250	70,718	100	100	200
300	84,861	100	100	200

Fuente: elaboración propia

Para este pre-experimento se realizan dos réplicas, con la finalidad de validar los datos obtenidos.

2.2.5.5 Análisis estadístico. Para llevar a cabo el análisis estadístico de los pre-experimentos 1 y 2, se toman los datos del número de células bajo los parámetros metodológicos para el conteo de microorganismos (ver numeral 2.2.5.1.1).

Dado que se realizaron conteos diarios en el pre experimento, se cuenta con los datos de concentración diarios para cada muestra, los cuales se registran desde el día 0 (inicio del pre experimento) hasta el día final del pre experimento. Para el pre experimento con dicromato de potasio se hace un seguimiento al cultivo de 10 días

y con óxido de cromo de solo 7 días por la rápida sedimentación que presenta la microalga *Scenedesmus dimorphus* en este medio. Para disminuir cualquier error humano que se pueda presentar en la pre experimentación, se realizan 3 repeticiones por cada día, y se sacan los respectivos promedios para cada resultado.

Para determinar si hay diferencias significativas entre las repeticiones de cada concentración y entre las muestras, se realiza un análisis de varianza “ANOVA” de un factor (pre-experimento 1) y de dos factores (pre-experimento 2), tomando como variable independiente la concentración de cromo y como variable respuesta la concentración celular. Se tiene en cuenta el valor de F con respecto al F crítico para determinar si se descarta o no alguna de las muestras. Las hipótesis que se formulan son: H_0 : No hay cambios significativos en las concentraciones y en H_1 : Hay cambios significativos en las concentraciones.

Para el desarrollo del ANOVA se utiliza la herramienta de análisis de datos del software Excel, usando la opción análisis de varianza de uno y dos factores, según corresponda al pre-experimento.

2.3 TERCERA ETAPA

En esta etapa se lleva a cabo el desarrollo del experimento con la concentración de cromo que arroja mejores resultados en el pre-experimento en cuanto crecimiento microalgal con el propósito de analizar la concentración final de cromo con el método colorimétrico, la velocidad específica de crecimiento y la producción de biomasa en los dos fotobiorreactores (panel plano y adaptado).

2.3.1 Desarrollo experimental. Consiste en llevar a volúmenes superiores de 4 L el mejor resultado obtenido en el pre-experimento 2, es decir, la proporción 1:1 entre microalga y dicromato de potasio (ver resultados 3.2.4). Con dicha relación, se realiza el cultivo en un fotobiorreactor adaptado y el fotobiorreactor de panel plano. Para los dos Fotobiorreactores se maneja un volumen de trabajo de 2 L, 1 L de inóculo microalgal y 1 L correspondiente a la concentración cromo escogido en la Segunda etapa. La proporción de este compuesto en el medio se fija tal como se muestra en la Tabla 3. Se asegura la concentración inicial igual para todos los ensayos por medio de diluciones y conteos hasta determinar la misma concentración microalgal.

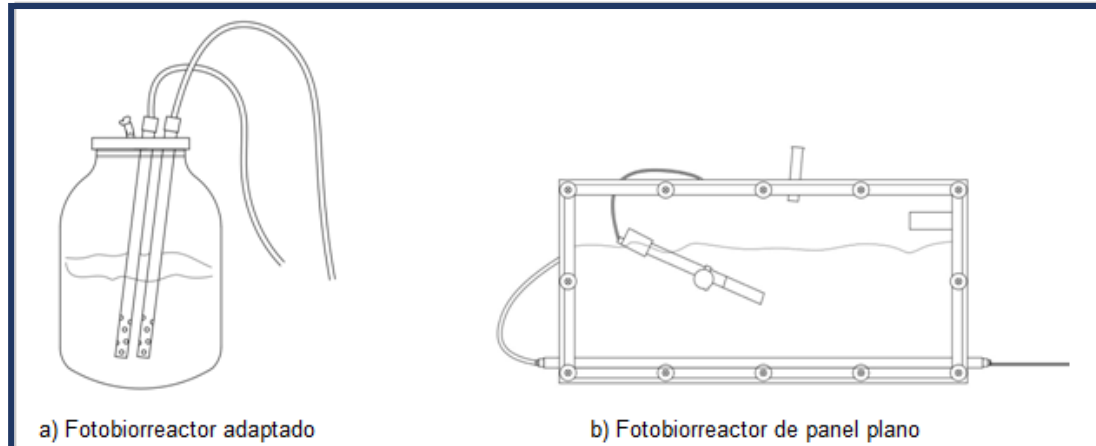
Tabla 3. Relaciones de volumen para el montaje del Experimento

Concentración de cromo [mg/L]	$K_2Cr_2O_7$ [mg]	Microalga [mL]	Agua destilada [mL]	Volumen total de trabajo [mL]
100	286,567	1000	1000	2000

Fuente: elaboración propia

El montaje del desarrollo experimental se muestra en la figura 11.

Figura 11. Montaje desarrollo experimental



Fuente: elaboración propia. a) Fotobiorreactor adaptado: recipiente de vidrio cilíndrico de 4 L, cuenta con dos tubos en su interior para la agitación y una manguera con un filtro de algodón como desgasificador. b) Fotobiorreactor de panel plano: recipiente rectangular de 3 L, en su interior tiene un tubo de PVC con orificios, que proporciona agitación al cultivo

- **Control.** Así mismo, se cultiva la microalga únicamente con foliagro (sin concentración de cromo) como cultivo de control, para determinar la influencia que tiene la presencia de cromo en la producción de biomasa. Este cultivo se realiza en el fotobiorreactor adaptado de 4, manejando una relación 1:1 de inóculo y medio de cultivo.

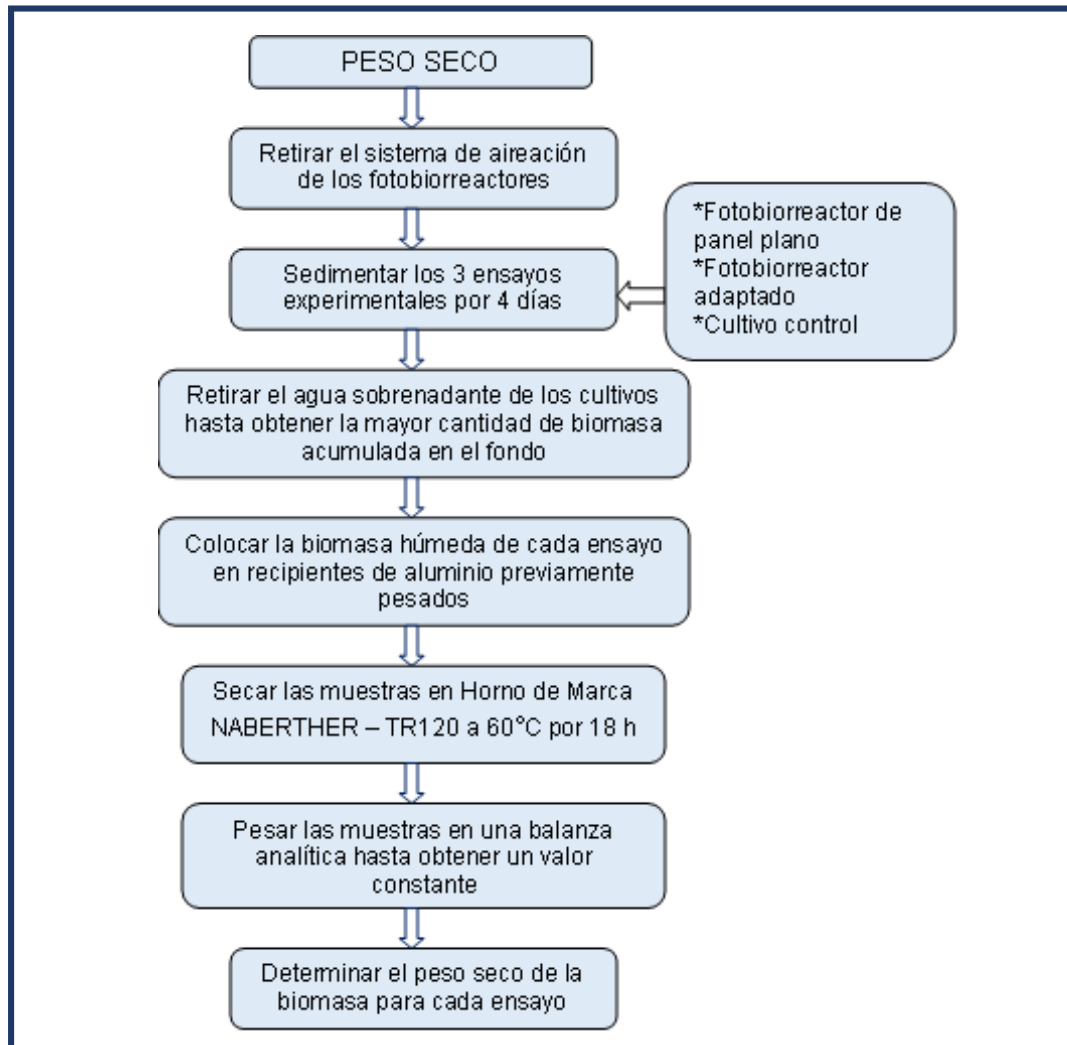
Para el experimento y cada una de sus réplicas, así como para el cultivo de control, el conteo de microorganismos y la elaboración de las curvas de crecimiento expresadas en el numeral 2.2.5.1 curvas de crecimiento, se hace un seguimiento por 14 días. Se realizan dos réplicas del experimento con tres repeticiones por muestra para cada día, con el fin de corroborar los datos obtenidos en las dos réplicas y reducir el error existente.

2.3.2 Peso seco y productividad volumétrica. Para el secado de muestras se emplea el protocolo del Anexo D basado en el libro: Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal⁵³ modificado (el secado se llevará a cabo a 60 °C, por un tiempo de 18 horas).

⁵³ DOMENICO V. & ARREDONDO, V. Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal. Capítulo 3: Determinación de peso seco y contenido orgánico e inorgánico. CIBNOR. México.

Con el propósito de determinar el peso seco de la biomasa, se sigue la secuencia mostrada en la figura 12.

Figura 12. Diagrama para la determinación de peso seco



Fuente: elaboración propia

Para determinar el peso seco de la biomasa, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Determinación de peso seco (PST)

$$PST (g/L) = \frac{(PSFM - PSF)}{VF}$$

Fuente: Arredondo, B., Voltolina, D. (2007). Determinación de peso seco y contenido orgánico e inorgánico. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Donde:

PST= Peso seco total

PSFM= Peso seco del filtro con muestra

PSF= Peso seco del filtro sin muestra

VF= Volumen de muestra filtrado

La productividad volumétrica se determina con la ecuación 5.

Ecuación 5. Productividad volumétrica

$$Productividad (g/L * días) = \frac{PST}{Vc * t}$$

Fuente: Rubio, D., Hernández, G. (2016). Evaluación de las incidencias de salinidad y pH sobre la biomasa, productividad y acumulación de lípidos en cultivos de *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de placa plana. Fundación Universidad de América

Donde:

PST= Peso seco total

Vc= Volumen total del cultivo

t= Tiempo de cultivo

2.3.3 Concentración final de cromo. Para mantener la integridad de la muestra de agua y la calidad de los resultados de los ensayos analíticos, los cultivos se dejan sedimentar por 5 días, se retira el agua de cada fotobiorreactor con ayuda de una jeringa de 60 mL y se deposita en un envase plástico respectivamente marcado, con un volumen mínimo de 250 mL.

Para determinar la concentración final de cromo hexavalente presente en las muestras de agua de cada fotobiorreactor, se realiza un análisis por método colorimétrico en Agrilab Laboratorios S.A.S.

2.3.4 Porcentaje de remoción. Para determinar el porcentaje de remoción de cromo en las muestras a analizar se utiliza la ecuación 6.

Ecuación 6. Porcentaje de remoción de cromo

$$\%remoción = \frac{(Concentración\ inicial - Concentración\ final)}{Concentración\ inicial} * 100\%$$

Fuente: Valencia, E., Aragón, R., Romero, J. (2012) Potencial de reutilización de del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Nátanga en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). Revista U.D.C.A Actualidad y divulgación científica.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 PRIMERA ETAPA

3.1.1 Revisión bibliográfica. La información recopilada se expone en la tabla 4, en la cual se evidencia una concentración de cromo máxima de 400 mg/L trabajado a escala planta piloto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la presente investigación se realiza a nivel laboratorio. Por lo tanto, se descarta cualquier dato que se haya realizado a una escala mayor, es así, que la concentración de 400 mg/L de Cr se rechaza, dando como resultado una concentración máxima de 300 mg/L de Cr a nivel laboratorio. Es así, que se determina un rango de concentración de cromo de 1 mg/L a 300 mg/L.

Por otra parte, la información refleja que en los experimentos se trabajan dos formas químicas del cromo las cuales son Cr (III) y Cr (VI), estas últimas se evaluarán en el pre experimento con el fin de definir cuál de las dos presenta mejor comportamiento en cuanto al crecimiento de biomasa microalgal.

Tabla 4. Información revisión y recopilación bibliográfica

TIPO DE AGUA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA USADA DE CROMO (mg/L)	VOLUMEN TOTAL DEL CULTIVO (mL)	REFERENCIA	ESCALA	ESPECIE	ESTADOS DE OXIDACIÓN DEL Cr
AGUA SINTÉTICA	[200]	9,81	(ARDILA,2012)	LABORATORIO	<i>Chlorella vulgaris</i> Y <i>Scenedesmus acutus</i>	Cr (III)
AGUA RESIDUAL CURTIEMBRE	[100]	7,79		LABORATORIO	<i>Chlorella vulgaris</i> Y <i>Scenedesmus acutus</i>	Cr (III)
AGUA RESIDUAL INDUSTRIA TEXTIL	[0,88]	500	(PÉREZ,K; VEGA, A; HERNÁNDEZ, L; PARRA, D BALLEN, M, 2016)	LABORATORIO	<i>Scenedesmus sp.</i>	Cr
CETP (UNNAO)	[11,48]	5000	(S. DWIVEDI, S. SRIVASTAVA, S. MISHRA, A. KUMAR, R.D.,2009)	LABORATORIO	Microalgas nativas	Cr (VI)
ESTANQUE CERCA DE LA ESTACIÓN DE POLICÍA	[0,19]	5000		LABORATORIO	Microalgas nativas	Cr (VI)
ESTANQUE CERCA DEL RÍO GANGA	[0,74]	5000		LABORATORIO	Microalgas nativas	Cr (VI)
GAGAN KHERA	[0,86]	5000		LABORATORIO	Microalgas nativas	Cr (VI)
MUNICIPIO SHUKLAGANJ	[2,27]	5000		LABORATORIO	Microalgas nativas	Cr (VI)

Tabla 4. Información revisión y recopilación bibliográfica (Continuación)

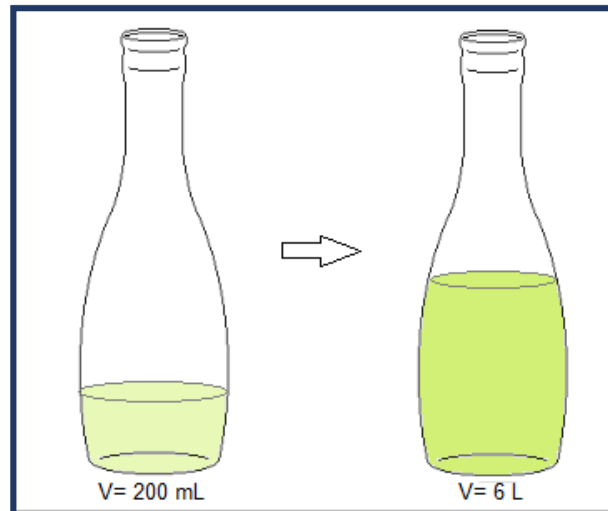
TIPO DE AGUA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA USADA DE CROMO (mg/L)	VOLUMEN TOTAL DEL CULTIVO (mL)	REFERENCIA	ESCALA	ESPECIE	ESTADOS DE OXIDACIÓN DEL Cr
AGUA SINTÉTICA	[300]	100	(AKHTAR,N; IQBAL,M; ZAFAR,S; 2008)	LABORATORIO	<i>Chlorella sorokiniana</i>	Cr (III)
AGUA SINTÉTICA	[400]	20000	(XU HAN, YUK SHAN WONG, NORA FUNG YEE TAM ,2006)	PLANTA PILOTO	<i>Chlorella miniata</i>	Cr (III)
AGUA SINTÉTICA (DESMINERALIZADA CON DICROMATO DE POTASIO	100	20	(XU HAN, YUK SHAN WONG,	LABORATORIO	<i>Chlorella miniata</i>	Cr (III)- Cr (VI)
	60	20	MING HUNG , NORA	LABORATORIO	<i>Chlorella miniata</i>	Cr (III)- Cr (VI)
	20	20	FUNG;2006)	LABORATORIO	<i>Chlorella miniata</i>	Cr (III)- Cr (VI)

Fuente: elaboración propia

3.2 SEGUNDA ETAPA

3.2.1 Producción del inóculo microalgal. La adaptación y crecimiento de la microalga en el medio de cultivo se hace notoria con el cambio de coloración: inicialmente el cultivo tiene un color verde claro, donde las células inician un proceso de adaptación y asimilación de los nutrientes del medio; después de 30 días, el color del cultivo se vuelve de un verde más oscuro, esto se debe al consumo del medio una vez se ha adaptado la microalga a las condiciones del cultivo. Regularmente se fue suministrando medio de cultivo foliagroso para realizar el escalamiento hasta llegar a un volumen de 6 L (ver figura 14).

Figura 13. Producción de inóculo microalgal



Fuente: elaboración propia

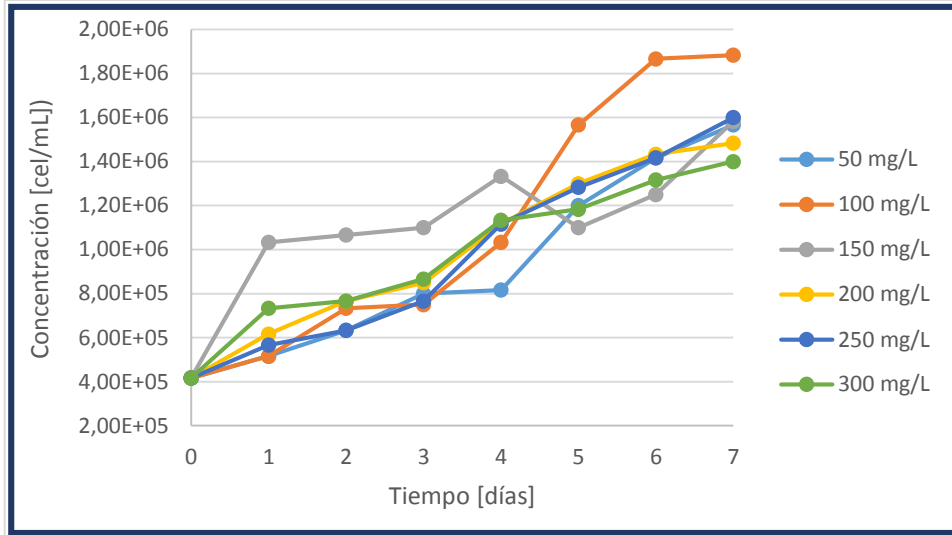
3.2.2 Pre-Selección teórica del estado de oxidación del Cr. Según la información obtenida de la revisión bibliográfica (2.1.1) expresada en la Tabla 4, se observa que el cromo se encuentra en estado de oxidación (III) y (VI), de manera que, para la pre-experimentación, se decide evaluar la incidencia de estos dos estados de valencia por su facilidad de obtención, conservación y disponibilidad en el laboratorio de la Universidad.

3.2.3 Pre-experimento 1. Para el desarrollo del pre-experimento se utiliza Óxido de Cromo (III) en las muestras a tratar; los cultivos se realizan de acuerdo con la metodología establecida y a cada uno de estos se les hace un seguimiento durante 7 días, expresado en conteos celulares.

A continuación, se muestran los conteos promedio para cada una de las concentraciones y su respectiva curva de crecimiento, como se observa en la gráfica 1. En el Anexo E se encuentra detalladamente los seguimientos de cultivo de cada

una de las concentraciones, para cada una de las repeticiones y sus respectivas curvas de crecimiento.

Gráfica 1. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 1. Óxido de cromo



Fuente: elaboración propia

Al evaluar el crecimiento celular utilizando óxido de cromo, se observa que la fase de adaptación de los cultivos ocurrió entre los días uno y dos, luego se nota un crecimiento en todos los cultivos, sin evidenciar la fase estacionaria ni de muerte, a excepción de la concentración de 150 mg/L, en donde se refleja una disminución de la concentración el día cinco. En el día cuatro se hace notorio el crecimiento celular acelerado que ocurre en la concentración de 100 mg/L con respecto a los otros, siendo éste el único que tuvo crecimiento exponencial hasta el día siete ($1,88 \times 10^6$ cel/mL).

Para este pre-experimento se realiza una sola réplica, puesto que el óxido de cromo al sedimentar rápidamente, puede generar futuros inconvenientes en el fotobiorreactor de panel plano al momento de llevar a cabo la experimentación.

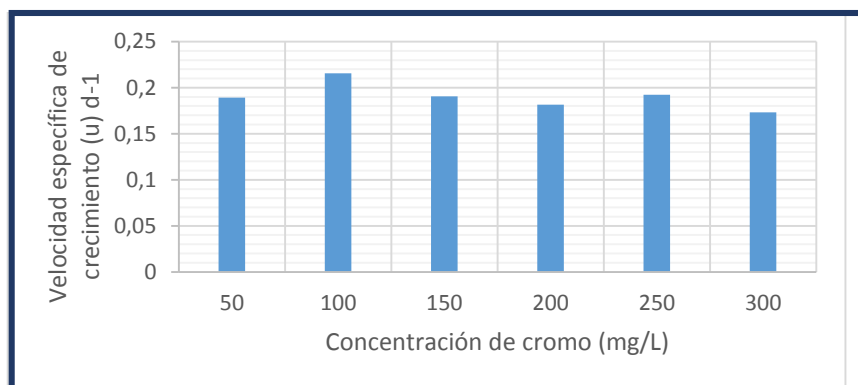
3.2.3.1 Velocidad específica de crecimiento Pre Experimento 1. Se calcula la velocidad específica de crecimiento mediante la ecuación 2 con el fin de determinar la mejor muestra de aumento de biomasa microalgal. Los resultados se muestran en la Tabla 5 y la gráfica 2.

Tabla 5. Velocidad específica de crecimiento μ , Pre-experimento 1

Concentración Cromo (mg/L)	Velocidad específica de crecimiento μ (d^{-1})
50	0,189
100	0,215
150	0,190
200	0,181
250	0,192
300	0,173

Fuente: elaboración propia

Gráfica 2. Velocidad específica de crecimiento para *Scenedesmus dimorphus* evaluada en medio con óxido de cromo (III)



Fuente: elaboración propia

Según los resultados obtenidos, la muestra que mayor velocidad específica de crecimiento obtuvo es la de concentración de cromo de 100 mg/L ($0,215d^{-1}$) a diferencia de las otras muestras.

No se realiza una segunda replica de este pre-experimento, porque se presentó un problema de sedimentación, debido a que el óxido de cromo es insoluble en agua⁵⁴ y por lo tanto, se necesita una agitación manual adicional a la generada por las bombas y ocasionaría dificultades en el fotobiorreactor.

3.2.3.2 Análisis estadístico Pre-experimento .Para determinar si hay diferencias significativas entre las muestras de cada concentración en el pre-experimento 1, se realizó un análisis de varianza de un factor, teniendo como variable dependiente la concentración celular y como variable independiente la concentración de cromo; se plantea que en H_0 : No hay cambios significativos en las concentraciones y en H_1 : Hay cambios significativos en las concentraciones. En la

⁵⁴ Diccionario de química. Editorial Complutense. (1999) p. 184

tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para cada concentración del pre-experimento.

Tabla 6. Análisis de varianza de un factor para el Pre-experimento 1

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2,224E+11	4,448E+10	0,241	0,942	2,438
Dentro de los grupos	7,756E+12	1,847E+11			
Total	7,979E+12				

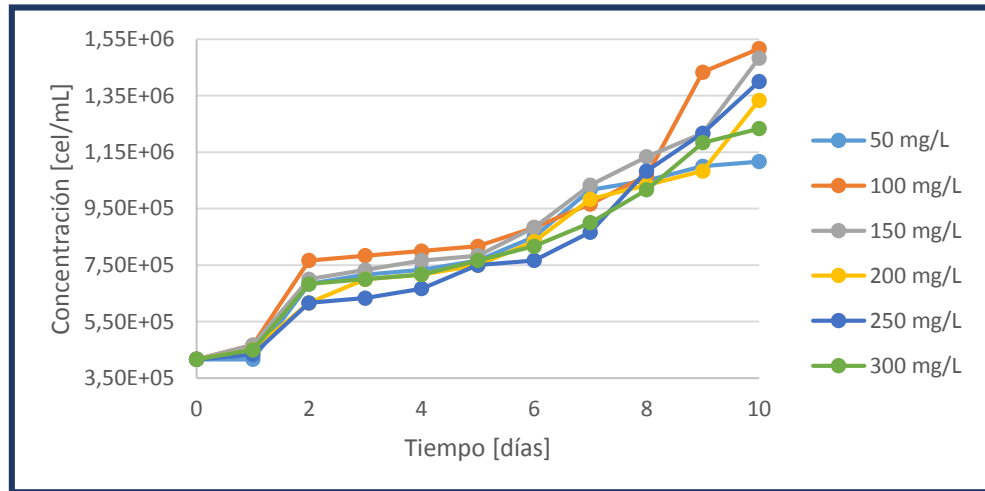
Fuente: elaboración propia

Para un nivel de significancia de 0,5; el valor de F es menor que el valor crítico para F, razón por la cual se acepta la hipótesis nula y se puede determinar que no hay cambios significativos en las concentraciones celulares de cada muestra en los cultivos del pre-experimento 1, descartando así cualquier error humano existente en el conteo de microorganismos.

3.2.4 Pre-experimento 2. Para este pre-experimento se utiliza Dicromato de Potasio en las muestras a analizar, los cultivos se efectuaron de acuerdo con lo determinado en la metodología, se realizan dos réplicas y a cada uno de estos se les hizo un seguimiento durante 10 días, expresado en conteos celulares.

3.2.4.1 Primera réplica. Para la primera réplica, se muestran los conteos promedio para cada una de las concentraciones y su respectiva curva de crecimiento, ver gráfica 3. En el Anexo F se encuentra claramente los seguimientos de cultivo de cada una de las concentraciones, para cada una de las repeticiones y sus respectivas curvas de crecimiento. Se realiza una dilución con medio de cultivo al volumen de trabajo de microalga con el fin de obtener la misma concentración inicial trabajada en el Pre-experimento No.1 correspondiente a $4,17E+05$ cel/mL.

Gráfica 3. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 2, Primera réplica Dicromato de potasio



Fuente: elaboración propia

Para el pre-experimento realizado con el dicromato de potasio, la concentración de 100 mg/L fue la que presentó mayor crecimiento celular ($1,52 \times 10^6$ cel/mL) hasta el día diez; de igual forma como ocurrió al utilizar el óxido de cromo a esta concentración. Se evidencia que la fase de adaptación de la microalga ocurre entre el día cero y uno, siendo más rápida que la obtenida en el pre-experimento 1. Contrario al pre-experimento 1 realizado con óxido de cromo, no se evidencia la fase estacionaria ni de muerte celular.

- **Velocidad específica de crecimiento Pre Experimento 2. Primera Réplica**

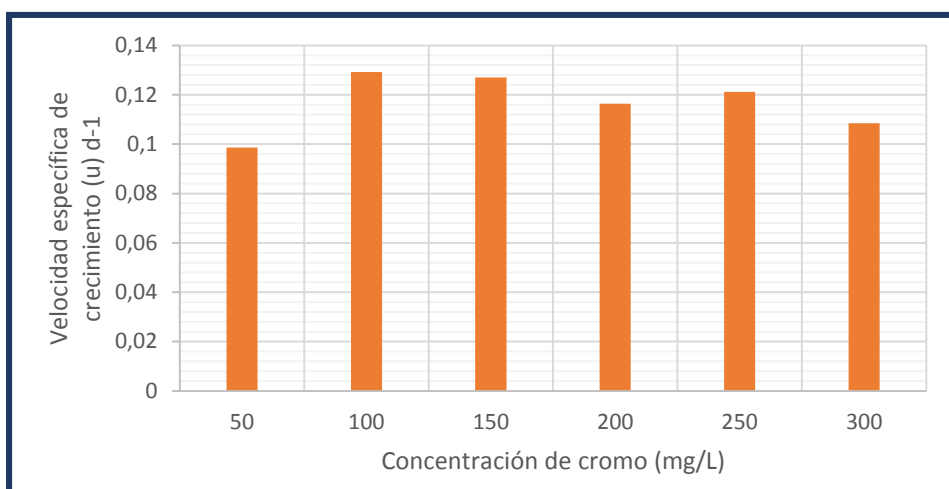
Se realiza cálculo de la velocidad específica de crecimiento (μ) usando la Ecuación 2 donde se muestran los resultados en la tabla 7 y la gráfica 4.

Tabla 7. Velocidad específica de crecimiento μ . Pre-experimento 2, Primera réplica

Concentración Cromo (mg/L)	Velocidad específica de crecimiento μ (d ⁻¹)
50	0,098
100	0,129
150	0,126
200	0,116
250	0,121
300	0,108

Fuente: elaboración propia

Gráfica 4. Velocidad específica de crecimiento para *Scenedesmus dimorphus* evaluada en medio con dicromato de potasio. Primera réplica



Fuente: elaboración propia

Así, a partir de estos resultados se puede evidenciar que la muestra que mayor velocidad específica de crecimiento presentó fue la de concentración de cromo 100 mg/L (0,126 d⁻¹), al igual que en el Pre experimento 1.

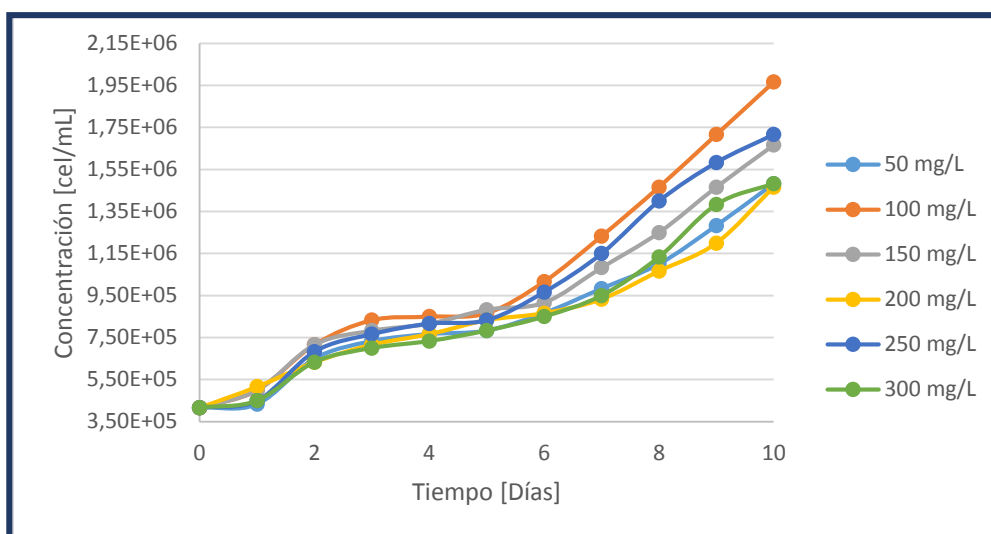
Contrario a lo realizado en el numeral anterior (3.2.3), desde un principio es notorio el crecimiento exponencial, y no se evidencia la fase estacionaria ni de muerte en ninguna de las concentraciones.

Una ventaja que presenta el dicromato de potasio frente del óxido de cromo es que es soluble en agua, no se sedimenta y no necesita una agitación manual adicional a la ya existente con las bombas.

3.2.4.2 Segunda réplica. En la segunda réplica, se muestran los conteos promedio para cada una de las concentraciones y su respectiva curva de crecimiento, ver gráfica 5. En el Anexo G se encuentra claramente los seguimientos de cultivo de cada una de las concentraciones, para cada una de las repeticiones y sus respectivas curvas de crecimiento.

Se realiza una dilución con medio de cultivo al volumen de trabajo de microalga con el fin de obtener la misma concentración inicial trabajada en el Pre-experimento No.1 y la primera réplica del Pre-experimento No.2 correspondiente a 4,17E+05 cel/mL

Gráfica 5. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 2, Segunda réplica



Fuente: elaboración propia

Para la segunda repetición del pre-experimento 2 realizado con el dicromato de potasio, la concentración de 100 mg/L fue la que presentó mejor adecuación al cultivo y mayor crecimiento celular ($1,97 \times 10^6$ cel/mL) hasta el día diez. Se demuestra que la fase de adaptación de la microalga ocurre entre el día cero y uno, igual que la obtenida en la primera réplica, y no se evidencia la fase estacionaria ni de muerte en ninguna de las concentraciones.

- **Velocidad específica de crecimiento Pre Experimento 2. Segunda Réplica**

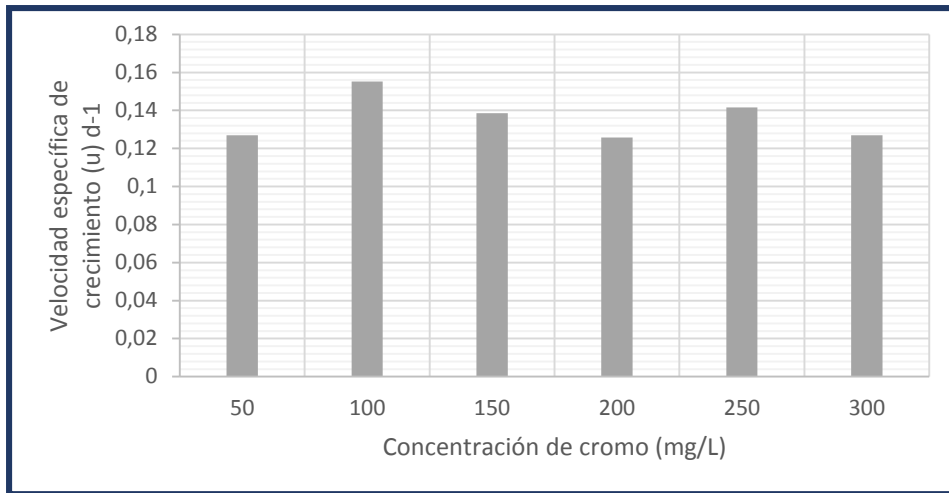
Se realiza cálculo de la velocidad específica de crecimiento (μ) usando la Ecuación 2, cuyos resultados se muestran en la tabla 8 y la gráfica 6.

Tabla 8. Velocidad específica de crecimiento μ , Pre-experimento 2, Segunda réplica

Concentración Cromo (mg/L)	Velocidad específica de crecimiento μ (d^{-1})
50	0,126
100	0,155
150	0,138
200	0,125
250	0,141
300	0,126

Fuente: elaboración propia

Gráfica 6. Velocidad específica de crecimiento para *Scenedesmus dimorphus* evaluada en medio con dicromato de potasio. Segunda réplica



Fuente: elaboración propia

A través de estos resultados, se puede evidenciar que la muestra que mayor velocidad específica de crecimiento presentó fue la de concentración de 100 mg/L de cromo (0,155 d⁻¹), al igual que la obtenida en la primera réplica.

3.2.4.3 Análisis estadístico Pre-experimento 2. Para determinar si hay diferencias significativas entre varias muestras por grupo de cada concentración en el pre-experimento 2, se llevó a cabo un análisis de varianza de dos factores, teniendo como variable dependiente la concentración celular y como variable independiente la concentración de cromo, y se propone que en H₀: No hay cambios significativos en las concentraciones y en H₁: Hay cambios significativos en las concentraciones.

Los resultados obtenidos para cada concentración se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Análisis de varianza de dos factores para el pre-experimento 2

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	2,958E+11	2,959 E+11	2,484	0,118	3,920
Columnas	3,718E+11	7,437 E+10	0,624	0,682	2,290
Interacción	8,351E+10	1,670 E+10	0,140	0,983	2,290
Dentro del grupo	1,429E+13	1,191,E+11			
Total	1,504 E+13				

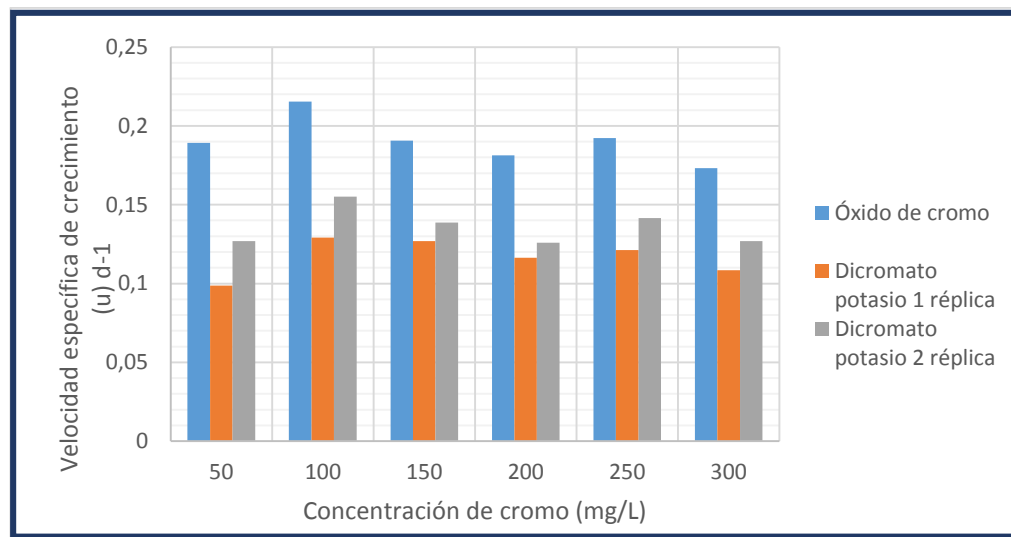
Fuente: elaboración propia

Para un nivel de significancia de 0,5; el valor de F es menor que el valor crítico para F, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se puede determinar que no hay diferencias significativas en las concentraciones celulares de cada réplica realizada en los cultivos del pre-experimento 2.

3.2.5 Resultados velocidades específicas crecimiento (Pre experimento 2).

Teniendo en cuenta los resultados de las velocidades específicas de crecimiento para el pre experimento 1 y pre experimento 2 con sus dos réplicas cada uno, se obtiene la gráfica 7, donde se evidencia que la concentración de 100 mg/L presentó mayor crecimiento en todos los casos.

Gráfica 7. Velocidades específicas de crecimiento Pre-Experimento 1 y Pre-Experimento 2. Primera y segunda réplica



Fuente: elaboración propia

Por lo mencionado anteriormente, se elige la concentración de 100 mg/L de cromo para continuar con la tercera etapa (experimento) con el fin de evaluar su crecimiento en el fotobiorreactor de panel plano y en el fotobiorreactor adaptado de mayor volumen, basados en los resultados obtenidos de las dos réplicas realizadas al pre-experimento No. 2 con dicromato de potasio, donde se evidencia el mayor crecimiento celular a esta concentración.

3.3 TERCERA ETAPA

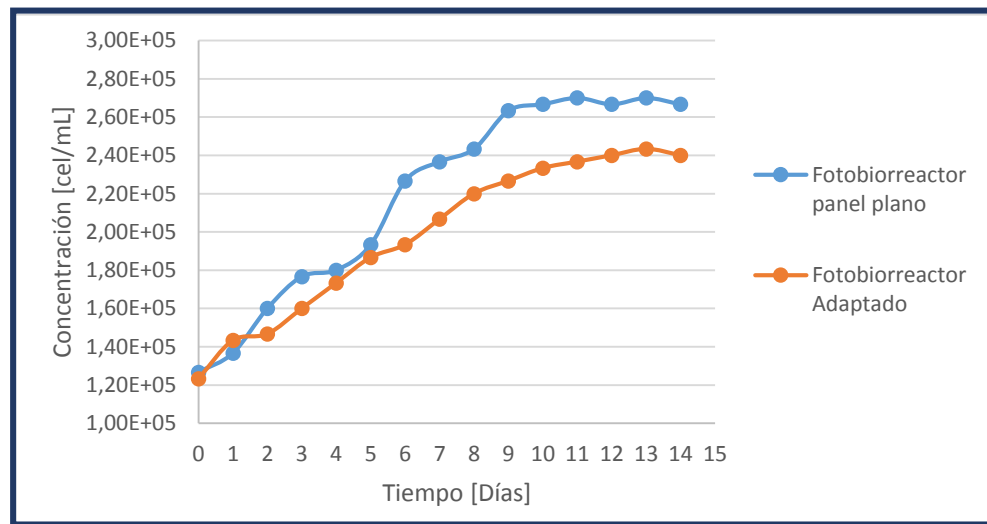
3.3.1 Desarrollo experimental. Se realiza el montaje en tres fotobiorreactores, dos adaptados y uno de panel plano, con una relación 1:1 bajo las condiciones establecidas. En uno de los reactores adaptados se cultiva el blanco (cultivo control) y en los dos restantes se cultiva la microalga y la concentración de cromo

seleccionada en el pre-experimento 2 (100 mg/L) diluida en agua destilada y se hacen dos réplicas para este último.

Durante un periodo de 14 días se realiza el seguimiento de cultivos mediante conteo en la cámara de Neubauer para las dos réplicas y el cultivo control.

3.3.2 Primera réplica. Para la primera réplica, se muestra claramente los conteos promedio para la concentración de 100 mg/L de cromo en los dos fotobiorreactores, para cada una de las repeticiones y sus respectivas curvas de crecimiento, como se observa en la gráfica 8.

Gráfica 8. Curvas de crecimiento y concentración celular experimento. Primera réplica



Fuente: elaboración propia

De la gráfica 8 se observa que el montaje realizado en el fotobiorreactor adaptado tarda más en acostumbrarse al medio, por lo que alcanza la menor concentración celular promedio ($2,40E+05$ cel/mL) al cabo de los 14 días de seguimiento al cultivo. Esto se debe a que, durante el crecimiento, las células que se encuentran más cerca a la luz cubren a las más lejanas y estas no reciben la cantidad de luz necesaria y esto conlleva a la ralentización de los procesos metabólicos y reproductores de la microalga⁵⁵.

En cuanto al montaje realizado en el fotobiorreactor de panel plano, se ve que inicia su fase exponencial rápidamente y la mantiene hasta el día 11, donde inicia la fase estacionaria. La concentración celular promedio máxima que se alcanza en este

⁵⁵ ARDILA, L. (2012). Medición de la capacidad de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* para la remoción de aguas de curtiembre. Universidad Nacional de Colombia. p. 95-96.

reactor utilizando dicromato de potasio es de $2,67E+05$ cel/mL, algo menor a la obtenida en los pre-experimentos realizados a esta misma concentración.

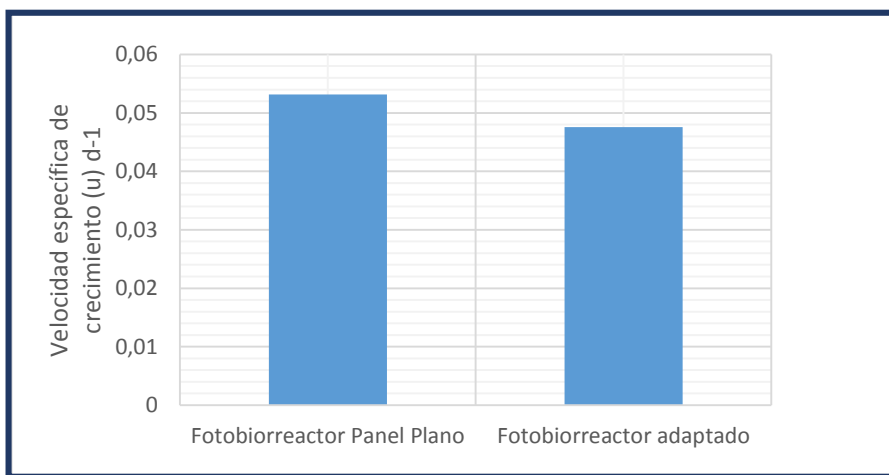
3.3.2.1 Velocidad específica de crecimiento Experimento. Primera réplica. Se realiza cálculo de la velocidad específica de crecimiento (μ) usando la Ecuación 2. Se muestran los resultados en la tabla 10 y la gráfica 9.

Tabla 10. Velocidad específica de crecimiento (μ) experimento. Primera réplica

Fotobiorreactor	Velocidad específica de crecimiento μ (d^{-1})
Panel Plano	0,053
Adaptado	0,048

Fuente: elaboración propia

Gráfica 9. Velocidad específica de crecimiento para *Scenedesmus dimorphus* evaluada en fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactor adaptado. Primera réplica



Fuente: elaboración propia

Según lo mostrado, se evidencia que la muestra con mayor velocidad específica de crecimiento se presentó en el fotobiorreactor de panel plano con $0,53 d^{-1}$. La razón de la diferencia en el crecimiento entre los dos fotobiorreactores se manifiesta por la forma geométrica de cada uno, puesto que en el fotobiorreactor de panel plano hay un mejor ingreso y dispersión de la luz hacia el interior.

3.3.2.2 Peso seco y productividad volumétrica. Se realiza el cálculo de peso seco y productividad volumétrica usando las Ecuaciones 3 y 4 respectivamente, donde los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Peso seco y productividad volumétrica primera réplica

Propiedad evaluada	Fotobiorreactor de panel plano	Fotobiorreactor adaptado
Volumen total del cultivo (L)	2	2
Volumen de muestra filtrado (L)	0,022	0,025
Peso seco del vidrio de reloj sin muestra (g)	3,587	3,587
Peso seco del vidrio de reloj con muestra (g)	3,816	3,798
Tiempo del cultivo (días)	14	14
Peso seco total (g/L)	10,405	8,428
Productividad volumétrica (g/L*días)	0,372	0,301

Fuente: elaboración propia

Para el peso seco total y la productividad volumétrica encontrada para la primera réplica del experimento, se observa que, bajo las mismas condiciones de cultivo y secado, el fotobiorreactor de panel plano presenta una mayor cantidad de biomasa seca y por ende una mayor productividad, a pesar de que el volumen de muestra filtrado (0,022 L) fue menor al del fotobiorreactor adaptado (0,025 L).

3.3.2.3 Concentración final de cromo. Según los análisis realizados por Agrilab Laboratorios S.A.S. se obtienen los informes de resultados sobre concentración final de cromo para el fotobiorreactor de adaptado y para el fotobiorreactor de panel plano (ver Anexo H), los cuales corresponden a 64,1 mg Cr⁺⁶/L y 74,6 mg Cr⁺⁶/L respectivamente, siendo mayor la remoción en el adaptado.

Es posible considerar que factores derivados de la agitación influyan en la remoción de cromo, como la transferencia de masa, velocidad superficial del fluido, incidencia de luz, distribución del medio y la presencia o ausencia de gradientes de cromo.

Se evalúa el porcentaje de remoción de cromo para cada una de las muestras a partir de la ecuación 5.

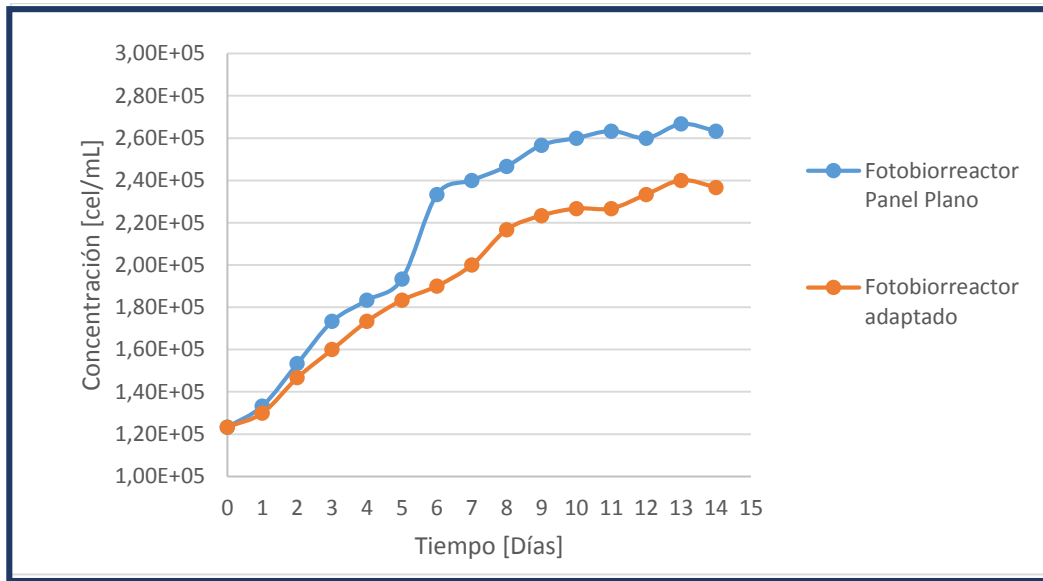
$$\begin{aligned} \%remoción \text{ fotobiorreactor de panel plano} &= \frac{(100 \text{ mg/L} - 74,6 \text{ mg/L})}{100 \text{ mg/L}} * 100\% \\ &= 25,4\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%remoción \text{ fotobiorreactor adaptado} &= \frac{(100 \text{ mg/L} - 64,1 \text{ mg/L})}{100 \text{ mg/L}} * 100\% \\ &= 35,9\% \end{aligned}$$

Según estos resultados, se determina que en el fotobiorreactor adaptado hubo un mayor porcentaje de remoción de cromo con respecto al otro reactor, con un valor de 35,9% de remoción.

3.3.3 Segunda réplica. Para la segunda réplica, se muestran nuevamente los conteos promedio para la concentración de 100 mg/L de cromo en los dos fotobiorreactores, para cada una de las repeticiones y sus respectivas curvas de crecimiento, como se observa en la gráfica 10.

Gráfica 10. Curvas de crecimiento y concentración celular experimento. Segunda réplica



Fuente: elaboración propia

De la gráfica 10, se observa que el montaje realizado en el fotobiorreactor adaptado tarda más en acostumbrarse al medio, por lo que alcanza la menor concentración celular promedio ($2,37E+05$ cel/mL) al cabo de los 14 días de seguimiento al cultivo.

En cuanto al montaje realizado en el fotobiorreactor de panel plano, se ve que inicia su fase exponencial rápidamente y la mantiene hasta el día 11 en el cual inicia la fase estacionaria, igual como ocurre en la primera réplica. La concentración celular promedio máxima que se alcanza en este reactor utilizando dicromato de potasio es de $2,63E+05$ cel/mL, algo menor a la obtenida en los pre-experimentos realizados a esta misma concentración. Esto se debe, a que al aumentar el volumen del medio de cultivo, la concentración de dióxido de carbono en el aire es

insuficiente para que las algas puedan transformarlo en azúcares y utilizarlos en las diferentes funciones celulares, por lo tanto, menor biomasa podrá crecer⁵⁶.

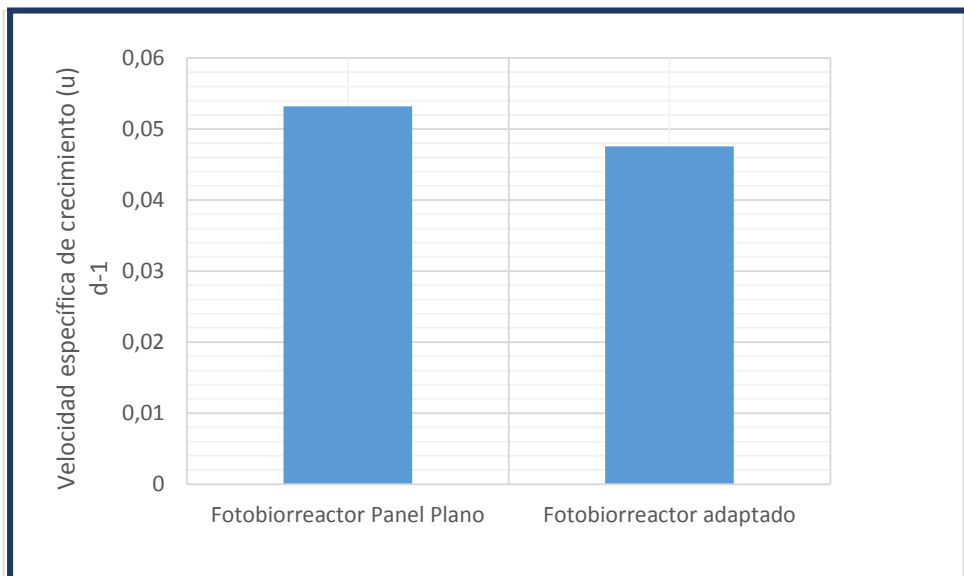
3.3.3.1 Velocidad específica de crecimiento Experimento. Segunda réplica. Se realiza cálculo de la velocidad específica de crecimiento (μ) usando la Ecuación 2. Se muestran los resultados en la tabla 12 y la gráfica 11.

Tabla 12. Velocidad específica de crecimiento μ experimento, Segunda réplica

Fotobiorreactor	Velocidad específica de crecimiento μ (d^{-1})
Panel Plano	0,054
Adaptado	0,047

Fuente: elaboración propia

Gráfica 11. Velocidad específica de crecimiento para *Scenedesmus dimorphus* evaluada en fotobiorreactor de panel plano y fotobiorreactor adaptado. Segunda réplica



Fuente: elaboración propia

A través de estos resultados, se puede evidenciar que la muestra con mayor velocidad específica de crecimiento se presentó en el fotobiorreactor de panel plano

⁵⁶ ARDILA, L. (2012). Medición de la capacidad de *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus* para la remoción de aguas de curtiembre. Universidad Nacional de Colombia. p. 96.

(0,54 d⁻¹). El fotobiorreactor mencionado anteriormente, tiene un comportamiento similar al presentado en la primera réplica.

3.3.4 Análisis estadístico experimento. Para determinar si hay diferencias significativas entre las réplicas del experimento, se llevó a cabo un análisis de varianza de dos factores, teniendo como variable dependiente la concentración celular y como variable independiente la concentración de cromo, y se propone que en H₀: No hay cambios significativos en las concentraciones y en H₁: Hay cambios significativos en las concentraciones.

Los resultados obtenidos para cada concentración se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis de varianza de dos factores para el experimento

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	111111111	111111111,1	0,077	0,781	3,954
Columnas	8,634E+11	4,317E+11	301,360	4,731E-39	3,105
Interacción	66822222,2	33411111,11	0,023	0,976	3,105
Dentro del grupo	1,203E+11	1432525403			
Total	9,839E+11				

Fuente: elaboración propia

Para un nivel de significancia de 0,5; el valor de F es menor que el valor crítico para F, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se puede determinar que no hay diferencias significativas en las concentraciones celulares de cada réplica realizada en los cultivos del experimento, descartando así algún error humano existente en el conteo de microorganismos.

4. CONCLUSIONES

- Se elige la concentración de 100 mg/L de cromo, al mostrar los mejores resultados en cuanto a concentración celular en el pre-experimento, para evaluar la velocidad específica de crecimiento, producción de biomasa y concentración final de cromo en el fotobiorreactor de panel plano y en el fotobiorreactor adaptado en la fase experimental.
- Se realizaron las curvas de crecimiento y concentración celular para el experimento, determinando que en el fotobiorreactor de panel plano hubo un mayor crecimiento celular ($2,67E+05$ cel/mL primera réplica y $2,63E+05$ segunda réplica) y una mayor velocidad específica de crecimiento ($0,053$ d⁻¹ primera réplica y $0,054$ d⁻¹ segunda réplica) en comparación con los resultados obtenidos en el fotobiorreactor adaptado para crecimiento celular y velocidad específica de crecimiento, ($2,40E+05$ cel/mL primera réplica y $2,37E+05$ cel/mL segunda réplica) y ($0,048$ d⁻¹ primera réplica y $0,047$ d⁻¹ segunda réplica) respectivamente.
- Comparando los porcentajes de remoción de cromo entre los diferentes fotobiorreactores, se encuentran valores muy cercanos entre el fotobiorreactor de panel plano (25,4%) y el fotobiorreactor adaptado (35,9%), siendo mayor en el adaptado, pero no se tiene certeza de qué factor pudo influir en este resultado.
- La forma geométrica del fotobiorreactor de panel plano al tener un mejor acceso y dispersión de la luz hacia el interior, generó notorios crecimientos celulares y superiores velocidades de crecimiento, que se interpretan en mayor productividad volumétrica en los cultivos de *Scenedesmus dimorphus*, en relación con el fotobiorreactor adaptado, con una productividad volumétrica de $0,372$ g/L*día respecto al reactor adaptado con tan solo $0,301$ g/L*día.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear agua residual industrial con alto contenido de cromo para próximos análisis experimentales y evaluar el porcentaje de remoción de cromo con la microalga *Scenedesmus dimorphus*.
- Se recomienda que la línea de investigación se enfoque en la hacer un proyecto que mida concentraciones de cromo mucho más elevadas a las trabajadas en este proyecto, para determinar el comportamiento de la microalga en el medio de cultivo.
- Se recomienda hacer un estudio más detallado del efecto de la agitación y de la geometría de los fotobiorreactores, sobre la capacidad de remoción de la microalga *Scenedesmus dimorphus*.
- Se recomienda prolongar el tiempo de experimentación (más de 14 días) con el fin de analizar los resultados sobre el porcentaje de remoción de cromo y compararlos con los obtenidos en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Agronutrientes, A. e. (s.f.). *AEFA*. Obtenido de <https://aefa.agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/fertilizante>

ALVAREZ, P. (2014). Optimización de la producción de microalgas con elevado contenido lipídico. *Dialnet*.

ANDRADE, C. V., CÁRDENAS, C., & MORALES, E. (2009). *Producción de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. Con aguas residuales de la industria pesquera*. Venezuela.

ANÓNIMO. (s.f.). *Ciclo celular y crecimiento*. Obtenido de <https://www.ugr.es/~eianez/Microbiologia/12crecimiento.htm>

ARCILA, J. (2017). *Generación de gránulos y aglomerados microalga-bacteria para el tratamiento de aguas residuales municipales y producción de metano*. México.

ARDILA, L. (2012). *Medición de la capacidad de Chlorella vulgaris y Scenedesmus acutus para la remoción de aguas de curtiembre*. Bogotá.

ARNÁIZ, C., ISAC, L., & LEBARTO, J. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. *idUS*.

BASTIDAS, O. (s.f.). *celeromics*. Obtenido de <http://www.celeromics.com/es/resources/docs/Articles/Conteo-Camara-Neubauer.pdf>

BENAVENTE, R. M. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*.

BENINTENDE, S., & SANCHEZ, C. (s.f.). *Facultad de ciencias agropecuarias*. Obtenido de http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/microbiologia/unidad_3_crecimiento_bacteriano.pdf

Bogotá, A. M. (2010). *Diagnostico Local con Participación Social: Localidad Sexta Tunjuelito*. Bogotá.

BRATCHELL, N., GIBSON, A., TRUMAN, M., KELLY, T., & ROBERTS, T. (1989). Prediciendo el comportamiento microbiano: las consecuencias de la cantidad de datos. *Revista Internacional de microbiología de los alimentos*, 47-58.

CANCER, I. N. (20 de Marzo de 2015). *Compuestos de cromo hexavalente*. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/cromo>

CANDELA, R. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica*. Bucaramanga.

CCI. (s.f.). *cci-calidad*. Obtenido de <http://www.cci-calidad.com/articulos866.htm>

CHAPARRO, G. (2017). Evaluación del suero lácteo en la producción de biomasa y lípidos en la microalga *Chlorella vulgaris* a escala de laboratorio. *Redalyc*, 19.

CHEREMISINOFF, N. (1997). *Biotecnología para el tratamiento de desechos y aguas residuales*.

DIAZ, V., & ORDOÑEZ, C. (2006). *Evaluación de pH y la agitación del medio más adecuada para el crecimiento de Dunaliella salina en condiciones laboratorio*. Bogotá.

EDER, N. (22 de Marzo de 2015). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/edya69/ecuacin-de-monod-copia>

ENFERMEDADES, A. P. (6 de Mayo de 2016). *ATSDR*. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html

FEINER, G. (2006). *Manual de productos cárnicos: ciencia práctica y tecnología*. Washington.

GÓMEZ, L. (2007). Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*.

GUTIERREZ, L., OCAMPO, M., MONTOYA, S., & SANCHEZ, Ó. (2016). Efecto de tres tipos de luz sobre el crecimiento de microalgas de *Scenedesmus* Sp.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, M. Y. (2005). *VI Fase de Seguimiento de Efluentes Industriales y Corrientes Superficiales de Bogotá D.C.* Bogotá.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas, NTC 4490. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 23 p.

IS, S., HN, J., & CG, L. (2 de Mayo de 2006). *NCBI*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16647774>

KUMAR, K. S., DAHMS, H.-U., WON, E.-J., LEE, J.-S., & SHIN, K.-H. (2014). Microalgas – Una herramienta prometedora para la remediación de metales pesados. *ELSEVIER*, 12-13.

MARTINEZ, L. (2012). *Eliminación de CO2 con microalgas autóctonas*. España.

MARTINEZ, O., PÉREZ, M., & NUÑO, F. (s.f.). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Marlenpmtz/colorimetria-61067922>

MERCADO TUPIÑO, E. (2016). *Cultivo de la microalga Scenedesmus Obliquus var. Dimorphus (TURPIN) para la obtención de biomasa y lípidos*. Lima.

METHA, S., & GAUR, J. (2008). Uso de algas para eliminar iones de metales pesados de aguas residuales: progreso y perspectivas. *Taylor & Francis Online*.

MONTEIRO, C., CASTRO, P., & MALCATA, X. (2012). Absorción de metal por microalgas: mecanismos subyacentes y aplicaciones prácticas . *Biotechnology Progress*, 299–311.

MONTES, M. (2010). *Desarrollo de un bioestimulante a base de microalgas y Bacterias para el tratamiento de influentes residuales*. México.

OLARTE, E., & MÓNICA, V. (2016). *Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en el tratamiento de aguas residuales industriales (Vinizas)*. Bogotá.

ORTIZ, N., & CARMONA, J. (2015). Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. *Scielo Colombia*, 117-126.

PÉREZ, V. (s.f.). *Onsalus*. Obtenido de <https://www.onsalus.com/definicion-de-inoculo-18541.html>

RAMOS, B. (01 de Enero de 2014). *Soy Medio Ambiente*. Obtenido de <http://soymedioambiente.com/biomasa-energia-renovable-organica>

RAOUF, N. H. (s.f.). Microalgas y tratamiento de aguas residuales. *Revista Saudita de Ciencias Biológicas*.

RIVERÓN, E., RAMIREZ, N., HERRERA, D., BARRERAS, G., ZAYAS, A., & REQUEIRO, A. (2012). Estación de trabajo para el estudio de la cinética de crecimiento de *Escherichia coli* mediante el método de turbidez. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 1-6.

ROA PARRA, A., & CAÑIZARES VILLANUEVA, R. (2012). Biorremediación de aguas con fosfatos y nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado. *Bistua: revista de ciencias básicas*, 71.

RUBIO, D., BARRERA, N., FONSECA, L., & JAIMES, C. (2017). Aspectos teóricos de la extracción de carotenoides a partir de microalgas.

SCHASCHKE, C. (2014). *Oxford Reference*. Obtenido de <https://app.knovel.com.ez.uamerica.edu.co/web/toc.v/cid:kpDCE00021/viewerType>

:toc/root_slug:dictionary-chemical-engineering/url_slug:kt00TW5UY3?b-q=growth curve&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default

SERRANO, L. (2012). *Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel*. Bogotá.

SEVERICHE, C., CASTILLO, M., & ACEVEDO, R. (2013). *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas*. Obtenido de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>

SIERRA HERRERA, J. A., FONSECA RUIZ, S., SANDOVAL HERRERA, J. A., & RUBIO FERNÁNDEZ, D. (2014). Diseño de un Fotobiorreactor Airlift a escala banco. *Politécnico Grancolombiano*, 123-143.

SOSA, J., & VASQUEZ, P. (2017). Evaluación del potencial de un residuo proveniente de la industria panelera como fuente de carbono para la producción de biomasa microalgal. *Repository*, 40.

SRIRAM, S., & SEENIVASAN, R. (2012). *Cultivo de microalgas en aguas residuales para la eliminación de nutrientes*.

SUNDARAM, S., & RAGHAVAN, P. (2011). Reactivos de cromo IV: aplicaciones sintéticas.

TÉLLEZ, J., CARVAJAL, M., & GAITÁN, A. (2004). Aspectos Toxicológicos Relacionados con la Utilización del Cromo en el proceso Productivo de Curtiembre. *Revista Facultad de Medicina Universidad Nacional de Colombia*, 50-61.

TORRENTERA, L. (1989). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB473S/AB473S00.htm>

TRAVIESO, L., BENITEZ, F., SÁNCHEZ, E., & PELLÓN, A. (2003). *Patente nº 22948*. Cuba.

VALLE, G. (2007). *Utilización de microalgas para la remoción de Cadmio y Zinc de efluentes de aguas residuales urbanas*. México.

VAZQUEZ, J. (29 de Mayo de 2011). *Onsalus*. Obtenido de <http://teclaboratorista2lm.blogspot.com.co/2011/05/camara-de-neubauer-la-camara-de.html>

VILLA, M. (2011). *ainia centro tecnológico*. Obtenido de <http://www.ainia.es/insights/microalgas-sabias-que/>

ANEXOS

ANEXO A
PROTOCOLO PARA PUESTA EN MARCHA DEL FOTOBIORREACTOR DE
PANEL PLANO

1. Desinfectar previamente a su uso, dejándolo conectado aproximadamente un mes, con una solución de agua e hipoclorito de sodio.
2. Vaciar el equipo y enjuagar perfectamente hasta asegurar que no quede nada de la solución contenida.
3. Inspeccionar visualmente el fotobiorreactor en el interior y comprobar que no existan biopelículas adheridas a las paredes o al tubo, en caso de que se presenten, se deben remover con agitación fuerte y si es necesario con ayuda de una manguera.
4. Repetir el proceso de desinfección con hipoclorito de sodio por 10 minutos y enjuagar con abundante agua, en caso de remover las biopelículas.
5. Prender el equipo y verificar su estado de asepsia.
6. Si se encuentra alguna biopelícula, repetir desde la recomendación 3.

Fuente: elaboración propia

ANEXO B
COMPOSICIÓN FERTILIZANTE AGRÍCOLA FOLIAGRO

Tabla 14. Composición del fertilizante Foliagro

Nitrógeno Total (N)	100,00 g/l	Boro (B)	0,20 g/l
Nitrógeno Amoniacal (N)	72,00 g/l	Cobre (Cu)*	0,20 g/l
Nitrógeno Nítrico (N)	3,20 g/l	Hierro (Fe)*	0,40 g/l
Nitrógeno Ureico (N)	24,80 g/l	Manganeso (Mn)*	0,40 g/l
Fósforo Asimilable (P ₂ O ₅)	300,00 g/l	Molibdeno (Mo)	0,03 g/l
Potasio Soluble en Agua (K ₂ O)	100,00 g/l	Zinc (Zn)*	0,50 g/l
Calcio (CaO)*	0,20 g/l	pH en solución al 10%	6,5
Magnesio (MgO)*	0,20 g/l	Densidad a 20 C	1,3 g/ml
Azufre Total (S)	0,80 g/l	*Quelutados con EDTA y ácido cítrico	

Fuente: Agro fertilizantes de Colombia


ANEXO C TÉCNICA ASÉPTICA

1. Trabajar siempre al lado de una llama. Esta llama crea a su alrededor una atmósfera estéril y además se utiliza para esterilizar o flamear parte del material que se utiliza durante la siembra.
2. Las asas deben esterilizarse antes de ser utilizadas y una vez esterilizadas deben enfriarse antes de tomar la muestra de microorganismos con objeto de no destruirlos con el calor. El asa se enfría sobre el agar o sobre el material de vidrio (en zonas estériles del material de vidrio).
Después de utilizar las asas, se vuelven a esterilizar.
3. Las bocas de los tubos y matraces de vidrio se flamean ligeramente una vez destapados y después de la inoculación.
4. Durante la inoculación, los tapones se mantienen en la mano sujetándolos por la parte que no entra en contacto con tubos y matraces.
5. Siempre que es necesario abrir un tubo debe mantenerse en posición inclinada para que el riesgo de contaminación sea mínimo.

Fuente: elaboración propia

ANEXO D PROTOCOLO PARA LA DETERMINACIÓN DE PESO SECO

Figura 15. Protocolo para la determinación de peso seco

GRUPO I+D:	BIOTECFUA
 laura.fonseca2@estudiantes.uamerica.edu.co maria.guarin@estudiantes.uamerica.edu.co	17 de Abril de 2018
DIRECTOR DIEGO RUBIO	Señores Centro de Bioprospección e Ingeniería Química Aplicada al Estudio de Biomoléculas e Industria – CBIQA – Fundación Universidad de América: Solicito a ustedes el uso del Horno de Marca NABERTHERM – TR120, en tal sentido doy a conocer la fecha, hora, tiempo de uso y otras especificaciones, lo que para ello anexo protocolo estandarizado para el tipo de procedimiento solicitado.
ESTUDIANTE (S) LAURA ANGELICA FONSECA MARIA PAULA GUARIN	Procedimiento solicitado de secado de muestras: Determinación de peso seco y contenido orgánico e inorgánico In book: Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal, Chapter: Determinación de peso seco y contenido orgánico e inorgánico, Publisher: CIBNOR, Editors: Arredondo-VegaBO, Voltolina, D
Semillero CBIQA:	*Protocolo para la determinación del peso seco total Tomar un volumen conocido del cultivo de microalga (homogenizar bien la muestra antes de proceder) y filtrar en los filtros de peso conocido.
Estudiante(s) encargado del servicio:	<ol style="list-style-type: none">Colocar los sobres (entreabiertos) con filtro en una estufa a temperatura entre 65 y 70 °C durante por lo menos 12 h (el tiempo de secado depende del tipo de estufa y de la humedad ambiental, además del volumen de la muestra).Pasar los filtros a un desecador, verificando que el silicagel esté libre de humedad. Aplicar vacío y dejar en el desecador durante 1.5 horas.Pesar rápidamente los filtros en una balanza analítica de 5 dígitos (sacando los filtros uno por uno del desecador y cerrándolo cada vez) hasta cuando la lectura se estabiliza.Regresar los filtros a la estufa y repetir la operación los dos días siguientes o hasta asegurarse que se logró peso constante.Por diferencia entre el peso del filtro lavado con agua destilada y seco con respecto al peso del filtro con la muestra seca dividido entre el volumen de cultivo filtrado, se obtiene el PESO SECO TOTAL (1/2g/mL o mg/L)

Fuente: Elaboración propia

ANEXO E
**CONCENTRACIÓN CELULAR Y CURVAS DE CRECIMIENTO DEL PRE-
EXPERIMENTO 1 ÓXIDO DE CROMO**

Tabla 15. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones. Pre-experimento 1 Óxido de cromo

Concentración celular [cel/mL]						
Día	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
0	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05
1	5,17E+05	5,16E+05	1,03E+06	6,17E+05	5,67E+05	7,33E+05
2	6,33E+05	7,33E+05	1,07E+06	7,67E+05	6,33E+05	7,67E+05
3	8,00E+05	7,50E+05	1,10E+06	8,50E+05	7,67E+05	8,67E+05
4	8,17E+05	1,03E+06	1,33E+06	1,12E+06	1,12E+06	1,13E+06
5	1,20E+06	1,57E+06	1,10E+06	1,30E+06	1,28E+06	1,18E+06
6	1,42E+06	1,87E+06	1,25E+06	1,43E+06	1,42E+06	1,32E+06
7	1,57E+06	1,88E+06	1,58E+06	1,48E+06	1,60E+06	1,40E+06

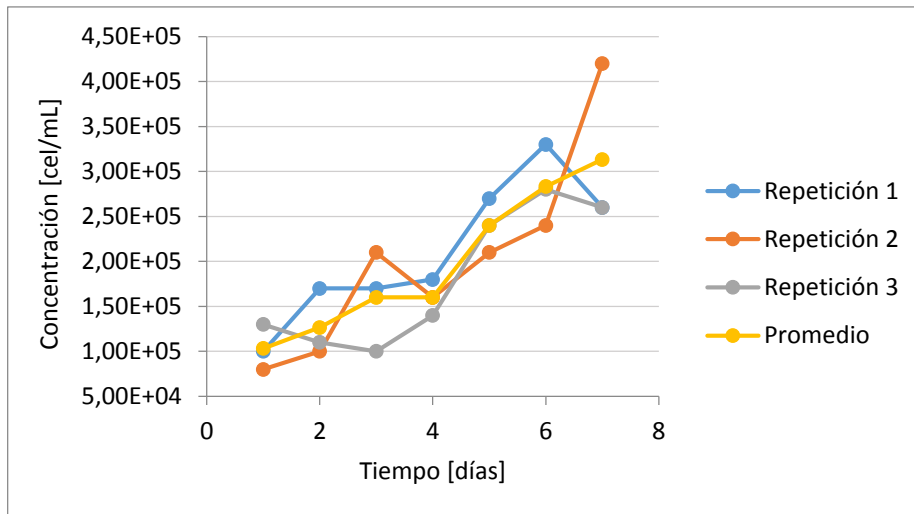
Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular a 50 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	1,00E+05	8,00E+04	1,30E+05	1,03E+05
2	1,70E+05	1,00E+05	1,10E+05	1,27E+05
3	1,70E+05	2,10E+05	1,00E+05	1,60E+05
4	1,80E+05	1,60E+05	1,40E+05	1,60E+05
5	2,70E+05	2,10E+05	2,40E+05	2,40E+05
6	3,30E+05	2,40E+05	2,80E+05	2,83E+05
7	2,60E+05	4,20E+05	2,60E+05	3,13E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 12. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



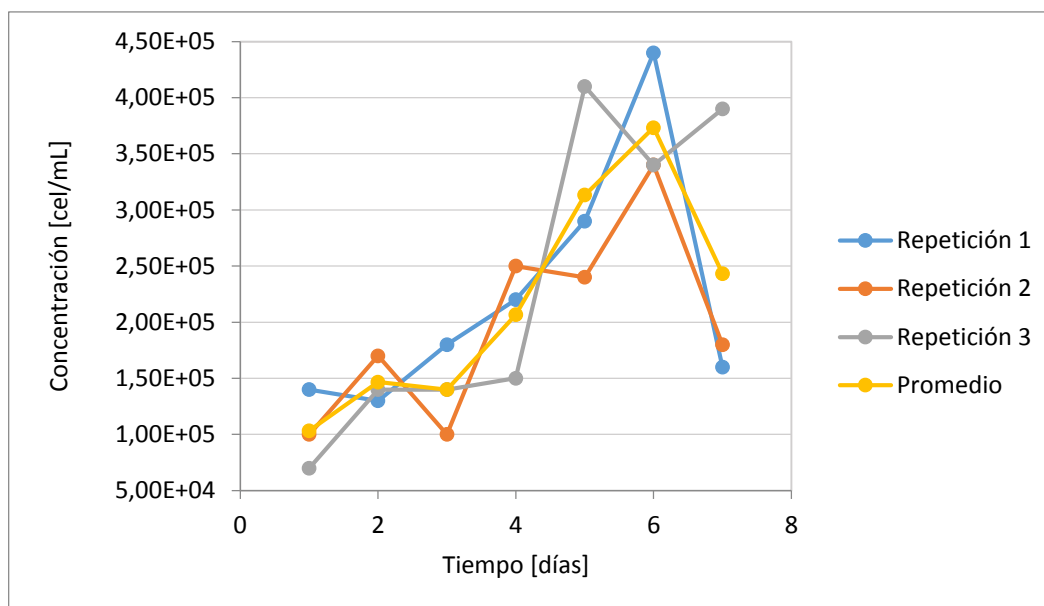
Fuente: elaboración propia

Tabla 17. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular de 100 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	1,40E+05	1,00E+05	7,00E+04	1,03E+05
2	1,30E+05	1,70E+05	1,40E+05	1,47E+05
3	1,80E+05	1,00E+05	1,40E+05	1,40E+05
4	2,20E+05	2,50E+05	1,50E+05	2,07E+05
5	2,90E+05	2,40E+05	4,10E+05	3,13E+05
6	4,40E+05	3,40E+05	3,40E+05	3,73E+05
7	1,60E+05	1,80E+05	3,90E+05	2,43E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 13. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



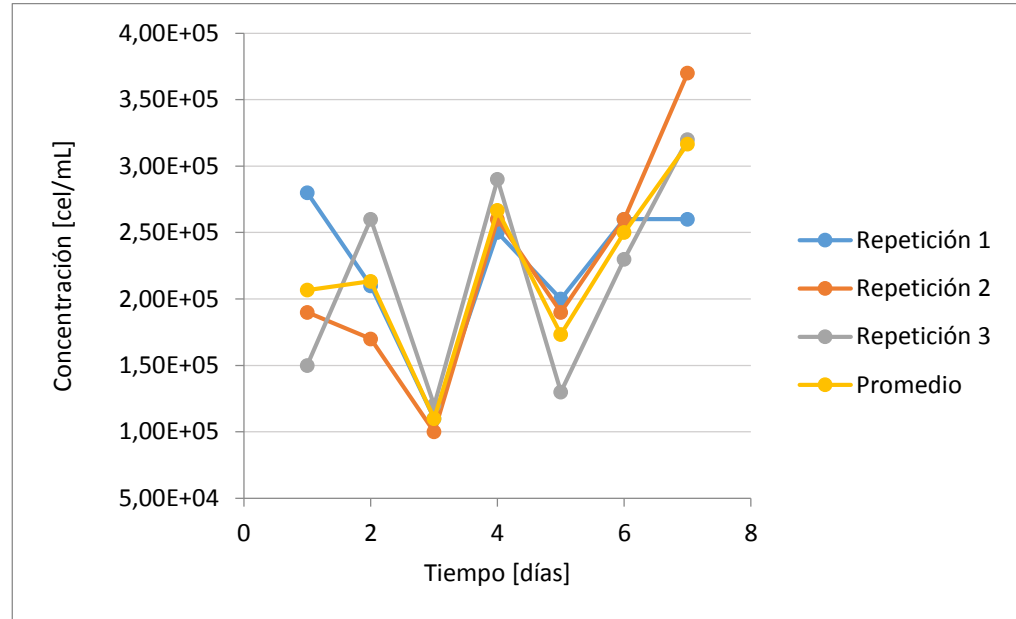
Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular de 150 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	2,80E+05	1,90E+05	1,50E+05	2,07E+05
2	2,10E+05	1,70E+05	2,60E+05	2,13E+05
3	1,10E+05	1,00E+05	1,20E+05	1,10E+05
4	2,50E+05	2,60E+05	2,90E+05	2,67E+05
5	2,00E+05	1,90E+05	1,30E+05	1,73E+05
6	2,60E+05	2,60E+05	2,30E+05	2,50E+05
7	2,60E+05	3,70E+05	3,20E+05	3,17E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 14. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



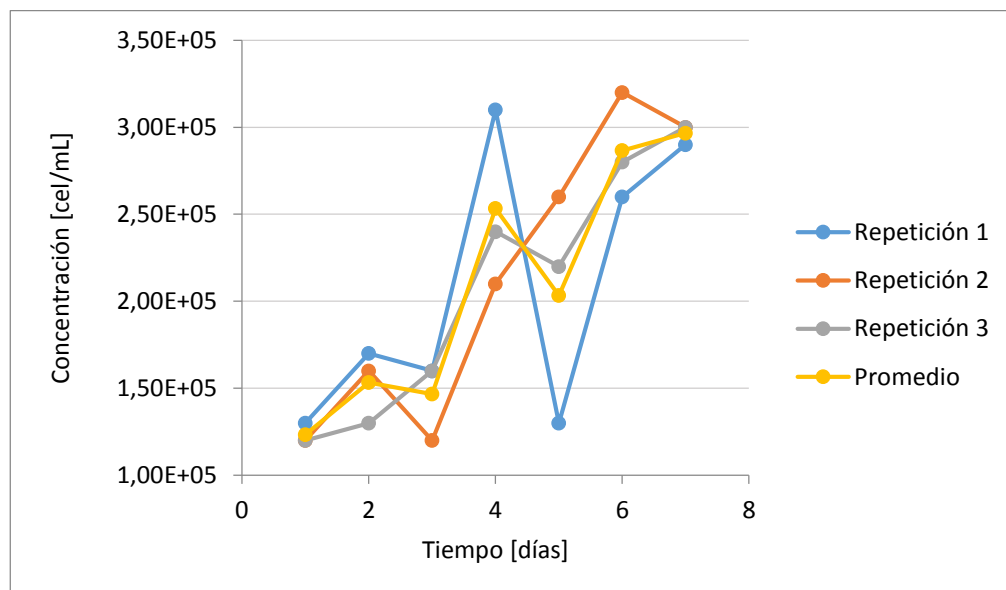
Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular de 200 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	1,30E+05	1,20E+05	1,20E+05	1,23E+05
2	1,70E+05	1,60E+05	1,30E+05	1,53E+05
3	1,60E+05	1,20E+05	1,60E+05	1,47E+05
4	3,10E+05	2,10E+05	2,40E+05	2,53E+05
5	1,30E+05	2,60E+05	2,20E+05	2,03E+05
6	2,60E+05	3,20E+05	2,80E+05	2,87E+05
7	2,90E+05	3,00E+05	3,00E+05	2,97E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 15. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



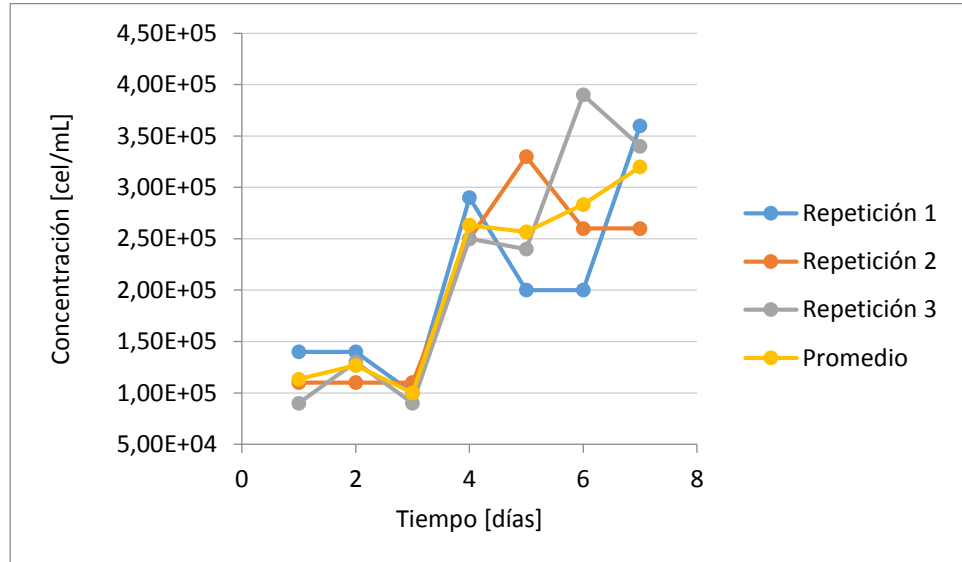
Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular de 250 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	1,40E+05	1,10E+05	9,00E+04	1,13E+05
2	1,40E+05	1,10E+05	1,30E+05	1,27E+05
3	1,00E+05	1,10E+05	9,00E+04	1,00E+05
4	2,90E+05	2,50E+05	2,50E+05	2,63E+05
5	2,00E+05	3,30E+05	2,40E+05	2,57E+05
6	2,00E+05	2,60E+05	3,90E+05	2,83E+05
7	3,60E+05	2,60E+05	3,40E+05	3,20E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 16. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



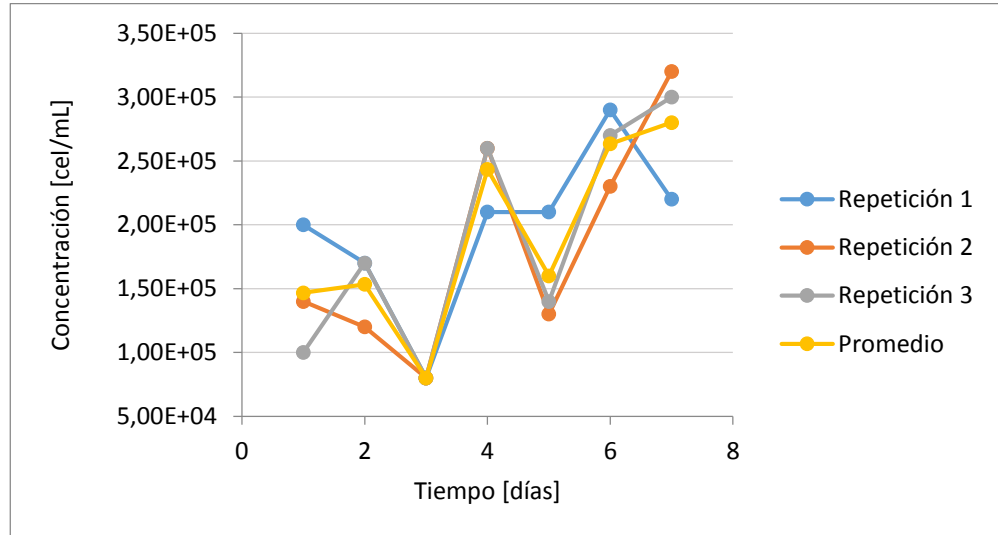
Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo

Concentración celular de 300 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	2,00E+05	1,40E+05	1,00E+05	1,47E+05
2	1,70E+05	1,20E+05	1,70E+05	1,53E+05
3	8,00E+04	8,00E+04	8,00E+04	8,00E+04
4	2,10E+05	2,60E+05	2,60E+05	2,43E+05
5	2,10E+05	1,30E+05	1,40E+05	1,60E+05
6	2,90E+05	2,30E+05	2,70E+05	2,63E+05
7	2,20E+05	3,20E+05	3,00E+05	2,80E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 17. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo (Pre experimento 1) Óxido de cromo



Fuente: elaboración propia

ANEXO F
**CONCENTRACIÓN CELULAR Y CURVAS DE CRECIMIENTO DEL PRE-
EXPERIMENTO 2, PRIMERA RÉPLICA DICROMATO DE POTASIO**

Tabla 22. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones de cromo del Pre-experimento 2, Primera réplica, Dicromato de potasio

Concentración celular [cel/mL]						
Día	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
0	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05
1	4,17E+05	4,67E+05	4,67E+05	4,50E+05	4,33E+05	4,50E+05
2	6,83E+05	7,67E+05	7,00E+05	6,17E+05	6,17E+05	6,83E+05
3	7,17E+05	7,83E+05	7,33E+05	7,00E+05	6,33E+05	7,00E+05
4	7,33E+05	8,00E+05	7,67E+05	7,17E+05	6,67E+05	7,17E+05
5	7,67E+05	8,17E+05	7,83E+05	7,50E+05	7,50E+05	7,67E+05
6	8,50E+05	8,83E+05	8,83E+05	8,33E+05	7,67E+05	8,17E+05
7	1,02E+06	9,67E+05	1,03E+06	9,83E+05	8,67E+05	9,00E+05
8	1,05E+06	1,07E+06	1,13E+06	1,03E+06	1,08E+06	1,02E+06
9	1,10E+06	1,43E+06	1,22E+06	1,08E+06	1,22E+06	1,18E+06
10	1,12E+06	1,52E+06	1,48E+06	1,33E+06	1,40E+06	1,23E+06

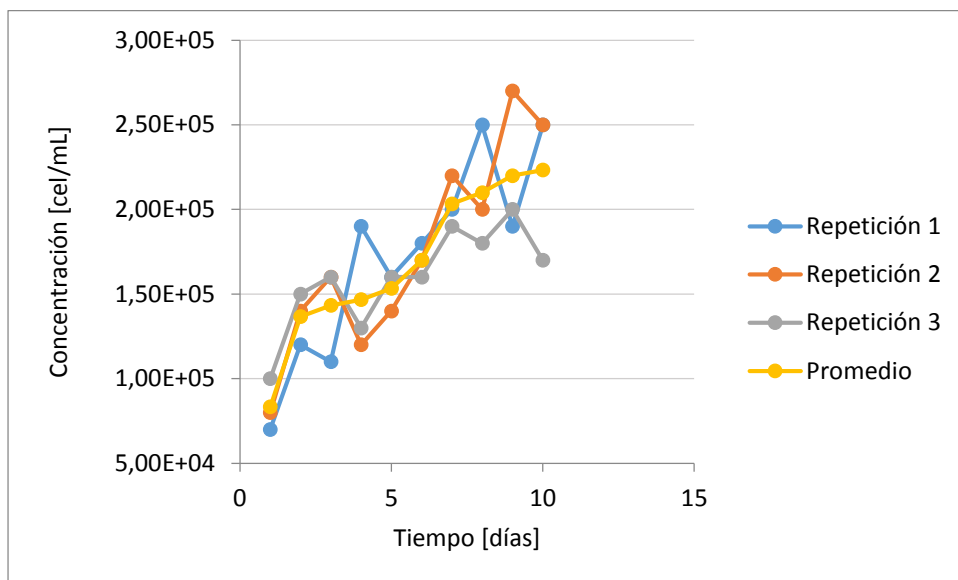
Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 50 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	7,00E+04	8,00E+04	1,00E+05	8,33E+04
2	1,20E+05	1,40E+05	1,50E+05	1,37E+05
3	1,10E+05	1,60E+05	1,60E+05	1,43E+05
4	1,90E+05	1,20E+05	1,30E+05	1,47E+05
5	1,60E+05	1,40E+05	1,60E+05	1,53E+05
6	1,80E+05	1,70E+05	1,60E+05	1,70E+05
7	2,00E+05	2,20E+05	1,90E+05	2,03E+05
8	2,50E+05	2,00E+05	1,80E+05	2,10E+05
9	1,90E+05	2,70E+05	2,00E+05	2,20E+05
10	2,50E+05	2,50E+05	1,70E+05	2,23E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 18. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



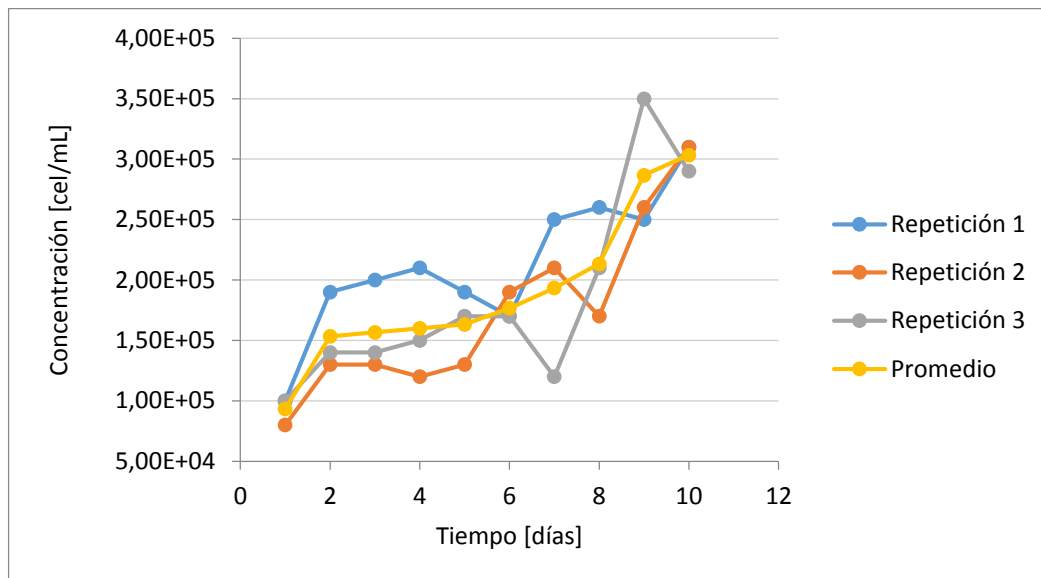
Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 100 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	1,00E+05	8,00E+04	1,00E+05	9,33E+04
2	1,90E+05	1,30E+05	1,40E+05	1,53E+05
3	2,00E+05	1,30E+05	1,40E+05	1,57E+05
4	2,10E+05	1,20E+05	1,50E+05	1,60E+05
5	1,90E+05	1,30E+05	1,70E+05	1,63E+05
6	1,70E+05	1,90E+05	1,70E+05	1,77E+05
7	2,50E+05	2,10E+05	1,20E+05	1,93E+05
8	2,60E+05	1,70E+05	2,10E+05	2,13E+05
9	2,50E+05	2,60E+05	3,50E+05	2,87E+05
10	3,10E+05	3,10E+05	2,90E+05	3,03E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 19. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



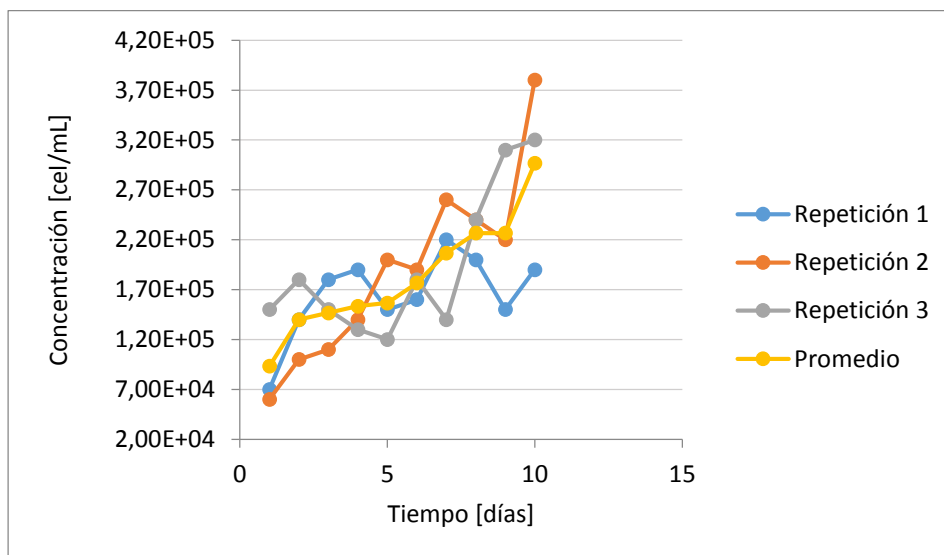
Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 150 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	7,00E+04	6,00E+04	1,50E+05	9,33E+04
2	1,40E+05	1,00E+05	1,80E+05	1,40E+05
3	1,80E+05	1,10E+05	1,50E+05	1,47E+05
4	1,90E+05	1,40E+05	1,30E+05	1,53E+05
5	1,50E+05	2,00E+05	1,20E+05	1,57E+05
6	1,60E+05	1,90E+05	1,80E+05	1,77E+05
7	2,20E+05	2,60E+05	1,40E+05	2,07E+05
8	2,00E+05	2,40E+05	2,40E+05	2,27E+05
9	1,50E+05	2,20E+05	3,10E+05	2,27E+05
10	1,90E+05	3,80E+05	3,20E+05	2,97E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 20. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



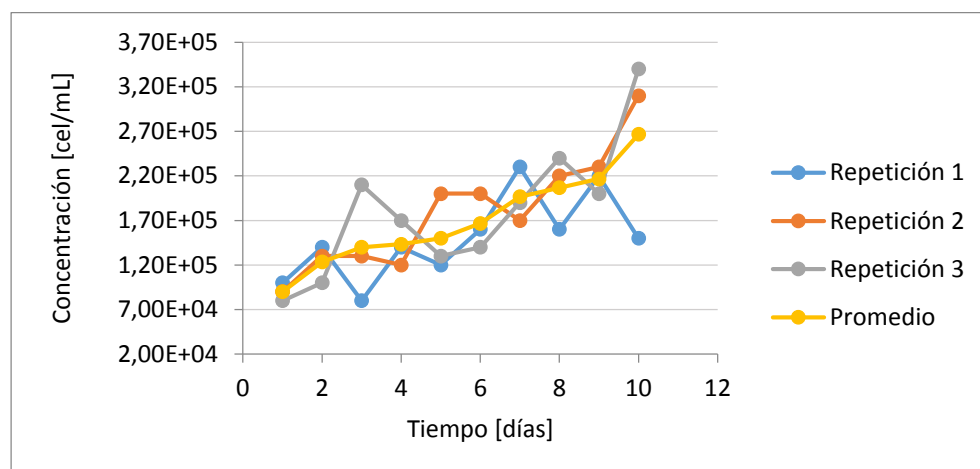
Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 200 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	1,00E+05	9,00E+04	8,00E+04	9,00E+04
2	1,40E+05	1,30E+05	1,00E+05	1,23E+05
3	8,00E+04	1,30E+05	2,10E+05	1,40E+05
4	1,40E+05	1,20E+05	1,70E+05	1,43E+05
5	1,20E+05	2,00E+05	1,30E+05	1,50E+05
6	1,60E+05	2,00E+05	1,40E+05	1,67E+05
7	2,30E+05	1,70E+05	1,90E+05	1,97E+05
8	1,60E+05	2,20E+05	2,40E+05	2,07E+05
9	2,20E+05	2,30E+05	2,00E+05	2,17E+05
10	1,50E+05	3,10E+05	3,40E+05	2,67E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 21. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



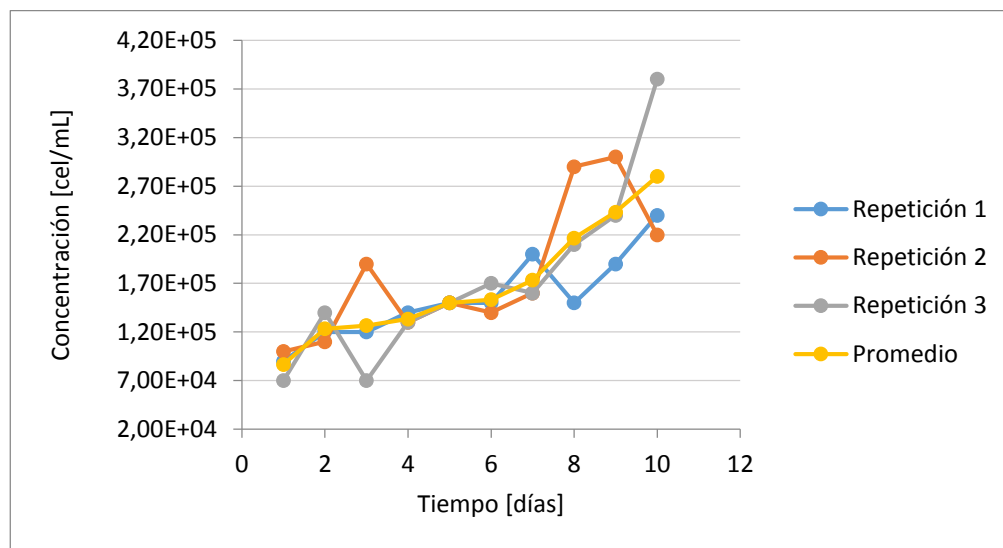
Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 250 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	9,00E+04	1,00E+05	7,00E+04	8,67E+04
2	1,20E+05	1,10E+05	1,40E+05	1,23E+05
3	1,20E+05	1,90E+05	7,00E+04	1,27E+05
4	1,40E+05	1,30E+05	1,30E+05	1,33E+05
5	1,50E+05	1,50E+05	1,50E+05	1,50E+05
6	1,50E+05	1,40E+05	1,70E+05	1,53E+05
7	2,00E+05	1,60E+05	1,60E+05	1,73E+05
8	1,50E+05	2,90E+05	2,10E+05	2,17E+05
9	1,90E+05	3,00E+05	2,40E+05	2,43E+05
10	2,40E+05	2,20E+05	3,80E+05	2,80E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 22. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



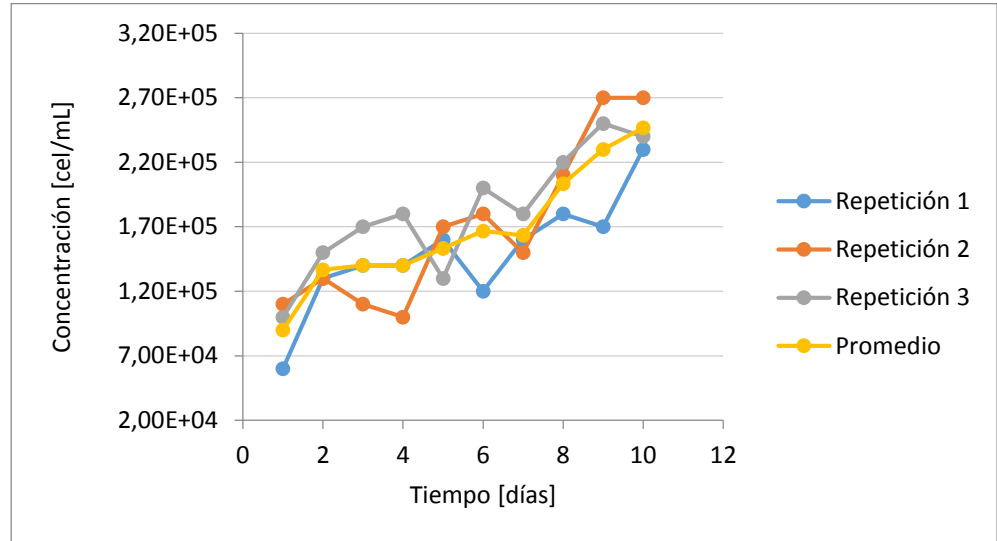
Fuente: elaboración propia

Tabla 28. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio

Concentración celular de 300 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	6,00E+04	1,10E+05	1,00E+05	9,00E+04
2	1,30E+05	1,30E+05	1,50E+05	1,37E+05
3	1,40E+05	1,10E+05	1,70E+05	1,40E+05
4	1,40E+05	1,00E+05	1,80E+05	1,40E+05
5	1,60E+05	1,70E+05	1,30E+05	1,53E+05
6	1,20E+05	1,80E+05	2,00E+05	1,67E+05
7	1,60E+05	1,50E+05	1,80E+05	1,63E+05
8	1,80E+05	2,10E+05	2,20E+05	2,03E+05
9	1,70E+05	2,70E+05	2,50E+05	2,30E+05
10	2,30E+05	2,70E+05	2,40E+05	2,47E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 23. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Primera réplica), Dicromato de potasio



Fuente: elaboración propia

ANEXO G
**CONCENTRACIÓN CELULAR Y CURVAS DE CRECIMIENTO DEL PRE-
EXPERIMENTO 2, SEGUNDA RÉPLICA DICROMATO DE POTASIO**

Tabla 29. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para cada una de las concentraciones de cromo. Pre-experimento 2, Segunda réplica. Dicromato de potasio

Concentración celular [cel/mL]						
Día	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
0	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05	4,17E+05
1	4,33E+05	5,00E+05	5,00E+05	5,17E+05	4,50E+05	4,50E+05
2	6,50E+05	7,17E+05	7,17E+05	6,33E+05	6,83E+05	6,33E+05
3	7,33E+05	8,33E+05	7,83E+05	7,17E+05	7,67E+05	7,00E+05
4	7,67E+05	8,50E+05	8,17E+05	7,67E+05	8,17E+05	7,33E+05
5	7,83E+05	8,67E+05	8,83E+05	8,33E+05	8,33E+05	7,83E+05
6	8,67E+05	1,02E+06	9,17E+05	8,67E+05	9,67E+05	8,50E+05
7	9,83E+05	1,23E+06	1,08E+06	9,33E+05	1,15E+06	9,50E+05
8	1,10E+06	1,47E+06	1,25E+06	1,07E+06	1,40E+06	1,13E+06
9	1,28E+06	1,72E+06	1,47E+06	1,20E+06	1,58E+06	1,38E+06
10	1,48E+06	1,97E+06	1,67E+06	1,47E+06	1,72E+06	1,48E+06

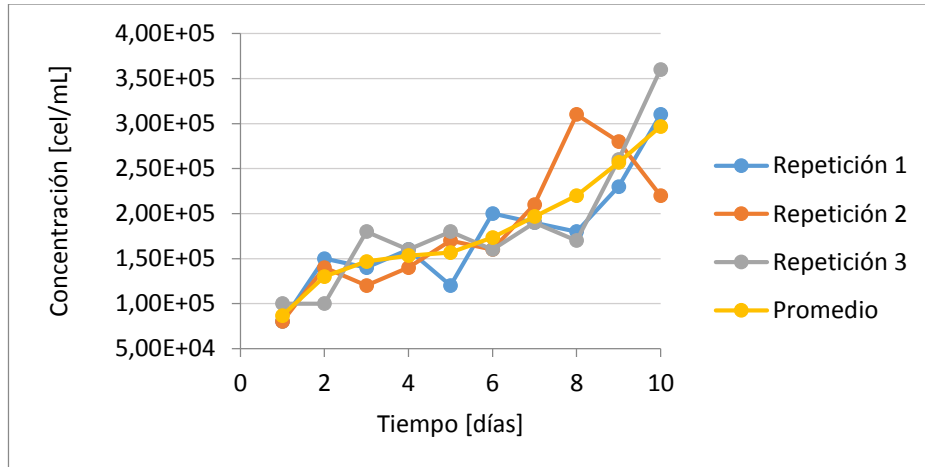
Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio

Concentración celular de 50 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	8,00E+04	8,00E+04	1,00E+05	8,67E+04
2	1,50E+05	1,40E+05	1,00E+05	1,30E+05
3	1,40E+05	1,20E+05	1,80E+05	1,47E+05
4	1,60E+05	1,40E+05	1,60E+05	1,53E+05
5	1,20E+05	1,70E+05	1,80E+05	1,57E+05
6	2,00E+05	1,60E+05	1,60E+05	1,73E+05
7	1,90E+05	2,10E+05	1,90E+05	1,97E+05
8	1,80E+05	3,10E+05	1,70E+05	2,20E+05
9	2,30E+05	2,80E+05	2,60E+05	2,57E+05
10	3,10E+05	2,20E+05	3,60E+05	2,97E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 24. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 50 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



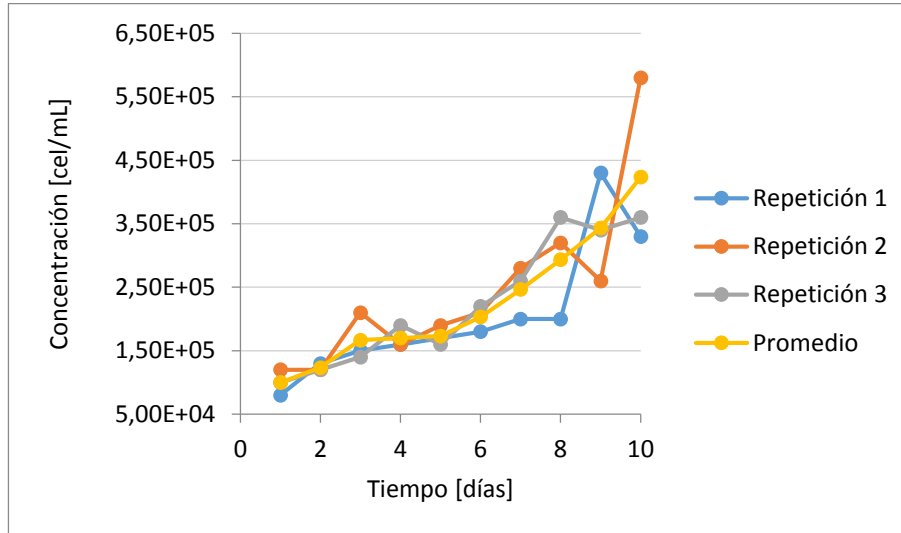
Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio

Concentración celular de 100 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	8,00E+04	1,20E+05	1,00E+05	1,00E+05
2	1,30E+05	1,20E+05	1,20E+05	1,23E+05
3	1,50E+05	2,10E+05	1,40E+05	1,67E+05
4	1,60E+05	1,60E+05	1,90E+05	1,70E+05
5	1,70E+05	1,90E+05	1,60E+05	1,73E+05
6	1,80E+05	2,10E+05	2,20E+05	2,03E+05
7	2,00E+05	2,80E+05	2,60E+05	2,47E+05
8	2,00E+05	3,20E+05	3,60E+05	2,93E+05
9	4,30E+05	2,60E+05	3,40E+05	3,43E+05
10	3,30E+05	5,80E+05	3,60E+05	4,23E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 25. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 100 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



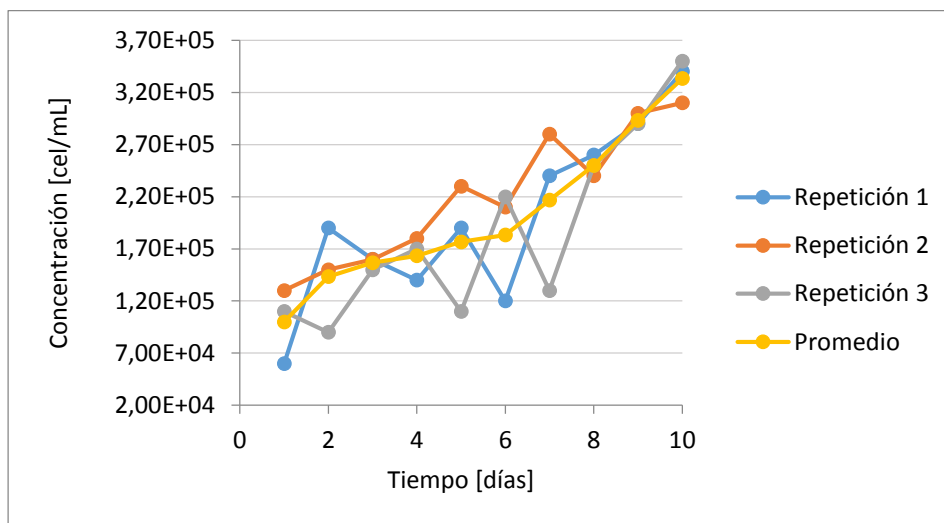
Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio

Concentración celular de 150 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	6,00E+04	1,30E+05	1,10E+05	1,00E+05
2	1,90E+05	1,50E+05	9,00E+04	1,43E+05
3	1,60E+05	1,60E+05	1,50E+05	1,57E+05
4	1,40E+05	1,80E+05	1,70E+05	1,63E+05
5	1,90E+05	2,30E+05	1,10E+05	1,77E+05
6	1,20E+05	2,10E+05	2,20E+05	1,83E+05
7	2,40E+05	2,80E+05	1,30E+05	2,17E+05
8	2,60E+05	2,40E+05	2,50E+05	2,50E+05
9	2,90E+05	3,00E+05	2,90E+05	2,93E+05
10	3,40E+05	3,10E+05	3,50E+05	3,33E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 26. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 150 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



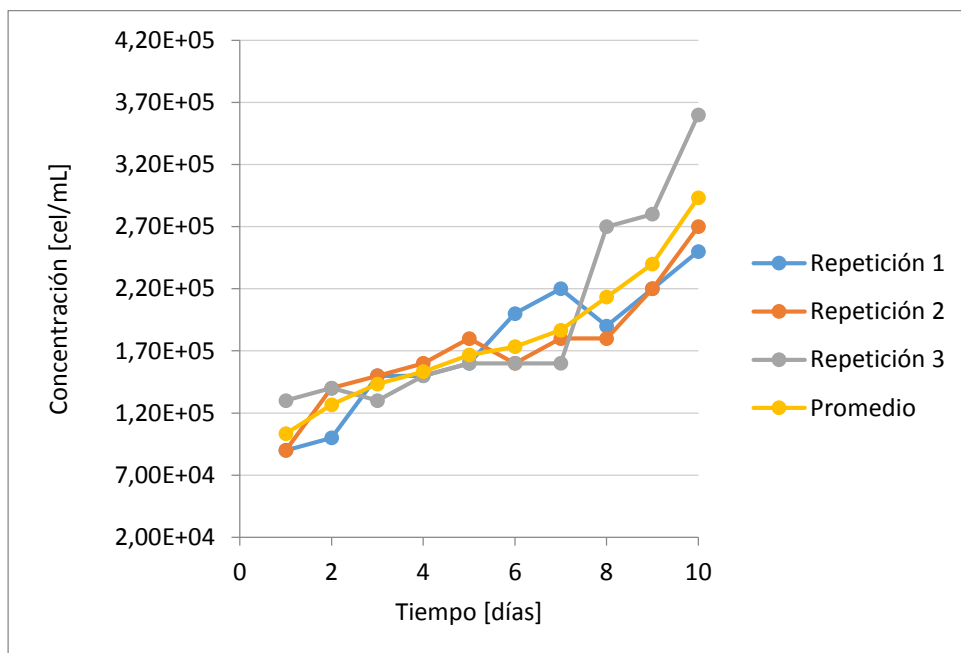
Fuente: elaboración propia

Tabla 33. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio

Concentración celular de 200 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	9,00E+04	9,00E+04	1,30E+05	1,03E+05
2	1,00E+05	1,40E+05	1,40E+05	1,27E+05
3	1,50E+05	1,50E+05	1,30E+05	1,43E+05
4	1,50E+05	1,60E+05	1,50E+05	1,53E+05
5	1,60E+05	1,80E+05	1,60E+05	1,67E+05
6	2,00E+05	1,60E+05	1,60E+05	1,73E+05
7	2,20E+05	1,80E+05	1,60E+05	1,87E+05
8	1,90E+05	1,80E+05	2,70E+05	2,13E+05
9	2,20E+05	2,20E+05	2,80E+05	2,40E+05
10	2,50E+05	2,70E+05	3,60E+05	2,93E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 27. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 200 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



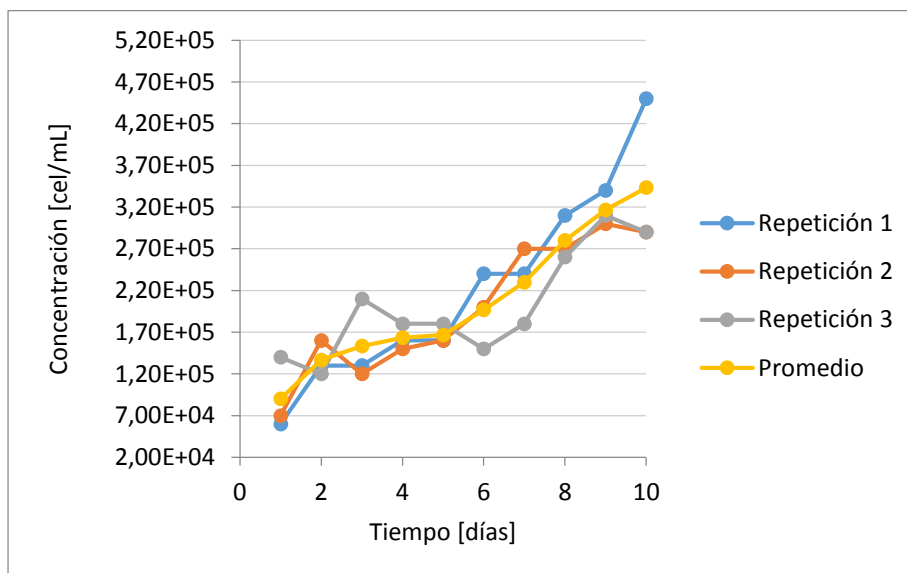
Fuente: elaboración propia

Tabla 34. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio

Concentración celular de 250 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
1	6,00E+04	7,00E+04	1,40E+05	9,00E+04
2	1,30E+05	1,60E+05	1,20E+05	1,37E+05
3	1,30E+05	1,20E+05	2,10E+05	1,53E+05
4	1,60E+05	1,50E+05	1,80E+05	1,63E+05
5	1,60E+05	1,60E+05	1,80E+05	1,67E+05
6	2,40E+05	2,00E+05	1,50E+05	1,97E+05
7	2,40E+05	2,70E+05	1,80E+05	2,30E+05
8	3,10E+05	2,70E+05	2,60E+05	2,80E+05
9	3,40E+05	3,00E+05	3,10E+05	3,17E+05
10	4,50E+05	2,90E+05	2,90E+05	3,43E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 28. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 250 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



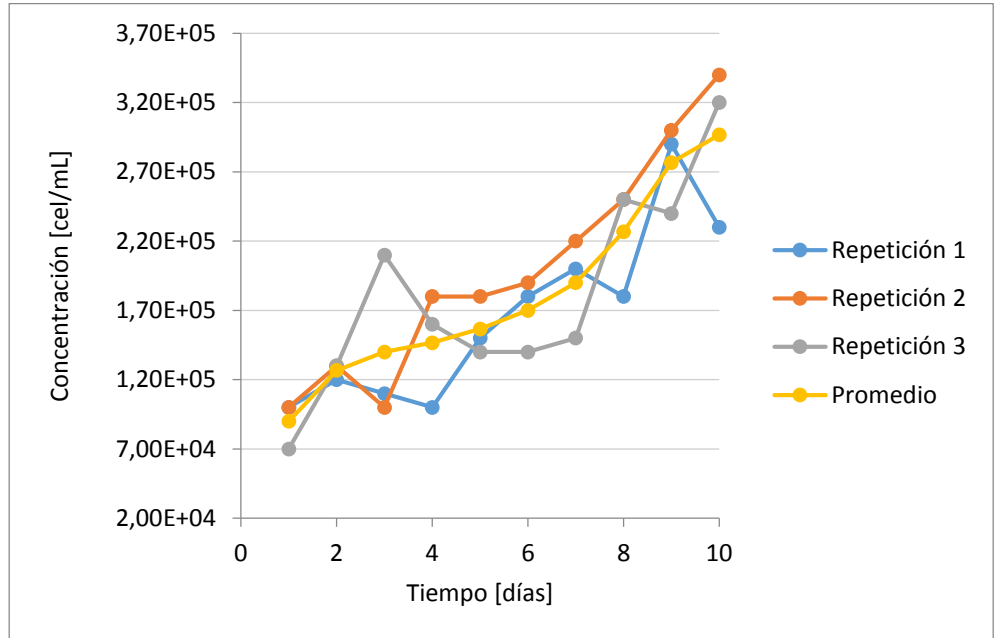
Fuente: elaboración propia

Tabla 35. Concentración celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo. Dicromato de potasio

Concentración celular de 300 mg/L de Cr [cel/mL]				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
1	1,00E+05	1,00E+05	7,00E+04	9,00E+04
2	1,20E+05	1,30E+05	1,30E+05	1,27E+05
3	1,10E+05	1,00E+05	2,10E+05	1,40E+05
4	1,00E+05	1,80E+05	1,60E+05	1,47E+05
5	1,50E+05	1,80E+05	1,40E+05	1,57E+05
6	1,80E+05	1,90E+05	1,40E+05	1,70E+05
7	2,00E+05	2,20E+05	1,50E+05	1,90E+05
8	1,80E+05	2,50E+05	2,50E+05	2,27E+05
9	2,90E+05	3,00E+05	2,40E+05	2,77E+05
10	2,30E+05	3,40E+05	3,20E+05	2,97E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 29. Curva de crecimiento celular de cada repetición para la concentración de 300 mg/L de cromo (Pre experimento 2- Segunda réplica) Dicromato de potasio



Fuente: elaboración propia

ANEXO H
CRECIMIENTO Y CONCENTRACIÓN CELULAR PROMEDIO DE LAS 3
REPETICIONES EXPERIMENTO. PRIMERA RÉPLICA

Tabla 36. Crecimiento y concentración celular experimento. Primera réplica

Concentración celular [cel/mL]		
Día	Fotobiorreactor Panel plano	Fotobiorreactor Adaptado
0	1,27E+05	1,23E+05
1	1,37E+05	1,43E+05
2	1,60E+05	1,47E+05
3	1,77E+05	1,60E+05
4	1,80E+05	1,73E+05
5	1,93E+05	1,87E+05
6	2,27E+05	1,93E+05
7	2,37E+05	2,07E+05
8	2,43E+05	2,20E+05
9	2,63E+05	2,27E+05
10	2,67E+05	2,33E+05
11	2,70E+05	2,37E+05
12	2,67E+05	2,40E+05
13	2,70E+05	2,43E+05
14	2,67E+05	2,40E+05

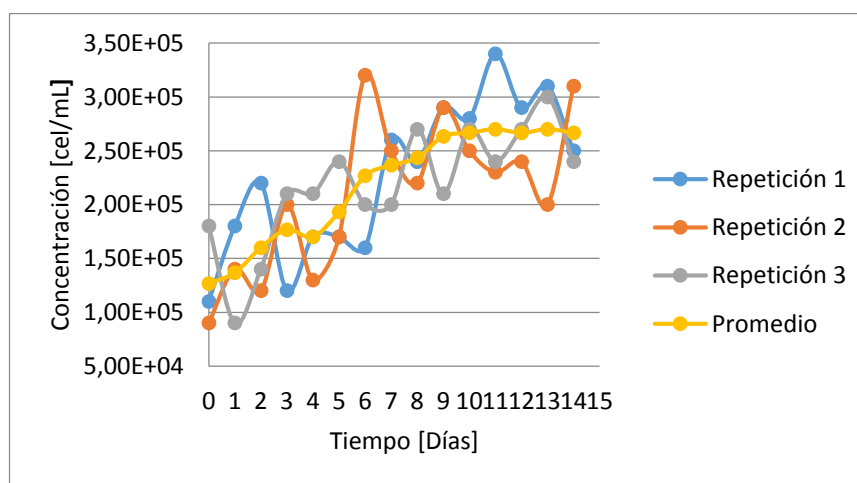
Fuente: elaboración propia

Tabla 37. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor de panel plano. Primera réplica

Concentración celular [cel/mL] Fotobiorreactor de panel plano				
Día	Repeticón 1	Repeticón 2	Repeticón 3	Promedio
0	1,10E+05	9,00E+04	1,80E+05	1,27E+05
1	1,80E+05	1,40E+05	9,00E+04	1,37E+05
2	2,20E+05	1,20E+05	1,40E+05	1,60E+05
3	1,20E+05	2,00E+05	2,10E+05	1,77E+05
4	1,70E+05	1,30E+05	2,10E+05	1,70E+05
5	1,70E+05	1,70E+05	2,40E+05	1,93E+05
6	1,60E+05	3,20E+05	2,00E+05	2,27E+05
7	2,60E+05	2,50E+05	2,00E+05	2,37E+05
8	2,40E+05	2,20E+05	2,70E+05	2,43E+05
9	2,90E+05	2,90E+05	2,10E+05	2,63E+05
10	2,80E+05	2,50E+05	2,70E+05	2,67E+05
11	3,40E+05	2,30E+05	2,40E+05	2,70E+05
12	2,90E+05	2,40E+05	2,70E+05	2,67E+05
13	3,10E+05	2,00E+05	3,00E+05	2,70E+05
14	2,50E+05	3,10E+05	2,40E+05	2,67E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 30. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de Cromo en el fotobiorreactor de panel plano. Primera réplica



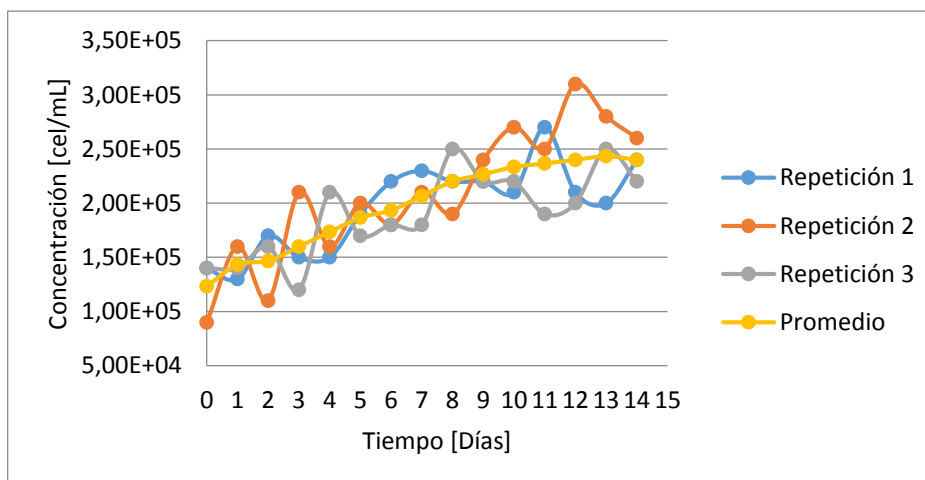
Fuente: elaboración propia

Tabla 38. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor adaptado. Primera réplica

Concentración celular [cel/mL] Fotobiorreactor adaptado				
Día	Repeticón 1	Repeticón 2	Repeticón 3	Promedio
0	1,40E+05	9,00E+04	1,40E+05	1,23E+05
1	1,30E+05	1,60E+05	1,40E+05	1,43E+05
2	1,70E+05	1,10E+05	1,60E+05	1,47E+05
3	1,50E+05	2,10E+05	1,20E+05	1,60E+05
4	1,50E+05	1,60E+05	2,10E+05	1,73E+05
5	1,90E+05	2,00E+05	1,70E+05	1,87E+05
6	2,20E+05	1,80E+05	1,80E+05	1,93E+05
7	2,30E+05	2,10E+05	1,80E+05	2,07E+05
8	2,20E+05	1,90E+05	2,50E+05	2,20E+05
9	2,20E+05	2,40E+05	2,20E+05	2,27E+05
10	2,10E+05	2,70E+05	2,20E+05	2,33E+05
11	2,70E+05	2,50E+05	1,90E+05	2,37E+05
12	2,10E+05	3,10E+05	2,00E+05	2,40E+05
13	2,00E+05	2,80E+05	2,50E+05	2,43E+05
14	2,40E+05	2,60E+05	2,20E+05	2,40E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 31. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor adaptado. Primera réplica



Fuente: elaboración propia

ANEXO I
CRECIMIENTO Y CONCENTRACIÓN CELULAR PROMEDIO DE LAS 3
REPETICIONES EXPERIMENTO. SEGUNDA RÉPLICA

Tabla 39. Crecimiento y concentración celular experimento. Segunda réplica

Concentración celular 100 [cel/mL]		
Día	Fotobiorreactor Panel Plano	Fotobiorreactor Adaptado
0	1,23E+05	1,23E+05
1	1,33E+05	1,30E+05
2	1,53E+05	1,47E+05
3	1,73E+05	1,60E+05
4	1,83E+05	1,73E+05
5	1,93E+05	1,83E+05
6	2,33E+05	1,90E+05
7	2,40E+05	2,00E+05
8	2,47E+05	2,17E+05
9	2,57E+05	2,23E+05
10	2,60E+05	2,27E+05
11	2,63E+05	2,27E+05
12	2,60E+05	2,33E+05
13	2,67E+05	2,40E+05
14	2,63E+05	2,37E+05

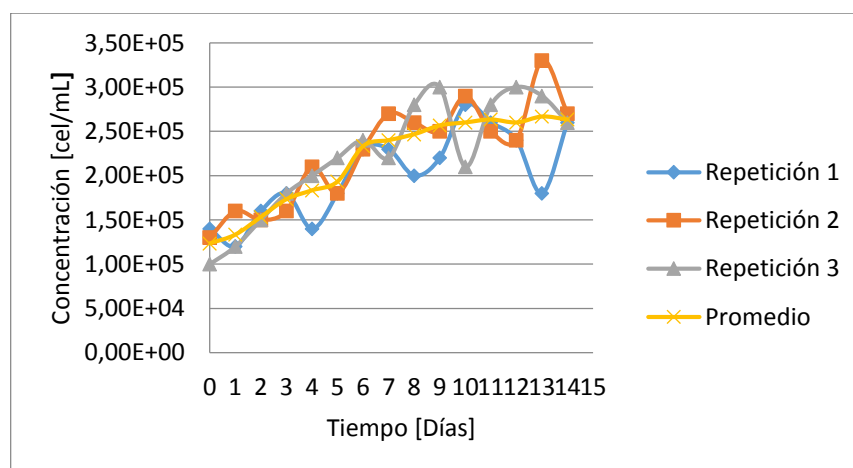
Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor de panel plano. Segunda réplica

Concentración celular [cel/mL] Fotobiorreactor de panel plano				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
0	1,40E+05	1,30E+05	1,00E+05	1,23E+05
1	1,20E+05	1,60E+05	1,20E+05	1,33E+05
2	1,60E+05	1,50E+05	1,50E+05	1,53E+05
3	1,80E+05	1,60E+05	1,80E+05	1,73E+05
4	1,40E+05	2,10E+05	2,00E+05	1,83E+05
5	1,80E+05	1,80E+05	2,20E+05	1,93E+05
6	2,30E+05	2,30E+05	2,40E+05	2,33E+05
7	2,30E+05	2,70E+05	2,20E+05	2,40E+05
8	2,00E+05	2,60E+05	2,80E+05	2,47E+05
9	2,20E+05	2,50E+05	3,00E+05	2,57E+05
10	2,80E+05	2,90E+05	2,10E+05	2,60E+05
11	2,60E+05	2,50E+05	2,80E+05	2,63E+05
12	2,40E+05	2,40E+05	3,00E+05	2,60E+05
13	1,80E+05	3,30E+05	2,90E+05	2,67E+05
14	2,60E+05	2,70E+05	2,60E+05	2,63E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 32. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor de panel plano. Segunda réplica



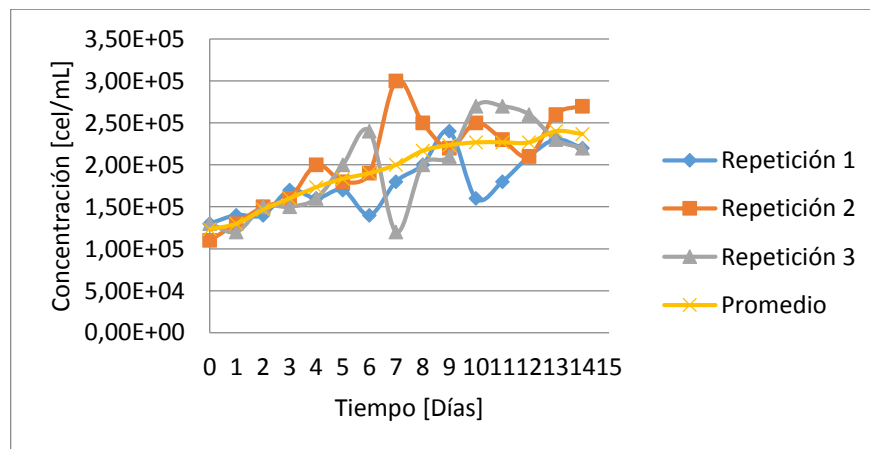
Fuente: elaboración propia

Tabla 41. Crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor adaptado. Segunda réplica

Concentración celular de [cel/mL] Fotobiorreactor adaptado				
Día	Repeticion 1	Repeticion 2	Repeticion 3	Promedio
0	1,30E+05	1,10E+05	1,30E+05	1,23E+05
1	1,40E+05	1,30E+05	1,20E+05	1,30E+05
2	1,40E+05	1,50E+05	1,50E+05	1,47E+05
3	1,70E+05	1,60E+05	1,50E+05	1,60E+05
4	1,60E+05	2,00E+05	1,60E+05	1,73E+05
5	1,70E+05	1,80E+05	2,00E+05	1,83E+05
6	1,40E+05	1,90E+05	2,40E+05	1,90E+05
7	1,80E+05	3,00E+05	1,20E+05	2,00E+05
8	2,00E+05	2,50E+05	2,00E+05	2,17E+05
9	2,40E+05	2,20E+05	2,10E+05	2,23E+05
10	1,60E+05	2,50E+05	2,70E+05	2,27E+05
11	1,80E+05	2,30E+05	2,70E+05	2,27E+05
12	2,10E+05	2,10E+05	2,60E+05	2,27E+05
13	2,30E+05	2,60E+05	2,30E+05	2,40E+05
14	2,20E+05	2,70E+05	2,20E+05	2,37E+05

Fuente: elaboración propia

Gráfica 33. Curva de crecimiento celular promedio de las tres repeticiones para la concentración de 100 mg/L de cromo en el fotobiorreactor adaptado. Segunda réplica



Fuente: elaboración propia

ANEXO J RESULTADOS CONCENTRACIÓN FINAL DE CROMO

Figura 15. Concentración final de cromo en el fotobiorreactor de panel plano



INFORME DE RESULTADOS AREA DE ANALISIS AMBIENTAL

Información del cliente			
Nombre:	Sra. LAURA ANGÉLICA FONSECA	Dirección:	No Suministrado
e-mail:	laura.fonseca2@estudiantes.uamerica.edu.co	Teléfono:	No Suministrado
Fecha ingreso	2018-04-24	Fecha Emisión	2018-05-08

Información de la muestra			
Tipo de Agua:	No Suministrado	Condiciones de recepción: Ninguna.	
Tipo de muestra:	No Suministrado		
Código de campo:	No Suministrado		
Identificación:	Fotobiorreactor - Repetición 1	Informe: AAA 10571	

Resultados Obtenidos

Variable	Resultado	Unidades	Método	Fecha de Análisis
Cromo Hexavalente	74,6	mg Cr ⁶⁺ /L	Directo / Colorimétrico / SM 3500-Cr B	2018-05-08

Observaciones a los resultados:	Convenciones
Ninguna.	- Valor inferior al límite de cuantificación del método. * Variable acreditada ** Variable subcontratada

Notas:
1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas. 2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. 3. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso. 4. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará únicamente dentro de los tiempos y condiciones estipulados por la Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM y el SM 1060. 5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente, del trabajo realizado por el subcontratista aprobado por la empresa, excepto en el caso en que el cliente o una autoridad reglamentaria especifique el subcontratista. 6. Si usted tiene alguna inquietud, queja o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquela a través del e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co

Informe de resultados autorizado por:

MYRIAM BENDECK LUGO
Química Director Técnico PQ-1168

Fin del informe

PAOLA DÍAZ PINTO
Química coordinadora de área - PQ 3257

R-AAA-1-010 V.2
Página 1 de 1

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA
 Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 223 1999 - Fax: 223 4087
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Fuente: Agrilab laboratorios SAS

Figura 16. Concentración final de cromo en el fotobiorreactor adaptado



INFORME DE RESULTADOS
AREA DE ANALISIS AMBIENTAL

Información del cliente			
Nombre:	Sra. LAURA ANGÉLICA FONSECA	Dirección:	No Suministrado
e-mail:	laura.fonseca2@estudiantes.uamerica.edu.co	Teléfono:	No Suministrado
Fecha Ingreso	2018-04-24	Fecha Emisión	2018-05-08
Información de la muestra			
Tipo de Agua:	No Suministrado	Condiciones de recepción: Ninguna.	
Tipo de muestra:	No Suministrado		
Código de campo:	No Suministrado		
Identificación:	Envase Vidrio - Repetición 1	Informe: AAA 10570	

Resultados Obtenidos

Variable	Resultado	Unidades	Método	Fecha de Análisis
Cromo Hexavalente	64,1	mg Cr ⁶⁺ /L	Directo / Colorimétrico / SM 3500-Cr B	2018-05-08

Observaciones a los resultados:	Convenciones
Ninguna.	<ul style="list-style-type: none"> < Valor inferior al límite de cuantificación del método. * Variable acreditada ** Variable subcontratada

Notas:
<ol style="list-style-type: none"> 1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas. 2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. 3. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso. 4. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará únicamente dentro de los tiempos y condiciones estipulados por la Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM y el SM 1060. 5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente, del trabajo realizado por el subcontratista aprobado por la empresa, excepto en el caso en que el cliente o una autoridad reglamentaria especifique el subcontratista. 6. Si usted tiene alguna inquietud, queja o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquela a través del e-mail: serviciocliente@agrilab.com.co

Informe de resultados autorizado por:

MYRIAM BENDECK LUGO
Química Director Técnico PQ-1168

Fin del informe

PAOLA DÍAZ PINTO
Química coordinadora de área - PQ 3257

R-AM-1-010 V.2
Página 1 de 1

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA
 Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 223 1999 - Fax: 223 4087
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: serviciocliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Fuente: Agrilab laboratorios SAS