



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA
TASA PARA LA COSECHA DE BIOMASA MICROALGAL, COMO
PARTE DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ERICK VIELMA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESINA: DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ

CIUDAD DE MÉXICO

FEBRERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería de la UNAM, por permitirme enriquecer mi formación académica.

Al Fondo Sectorial CONACYT – SENER - Sustentabilidad energética por el apoyo recibido para la realización y conclusión de este trabajo.

A mi tutor, el Dr. Ignacio Monje Ramírez, por su paciencia y asesoría durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería. A lo largo de este tiempo se ha convertido en un buen amigo.

Al Dr. Enrique César Valdés, por los consejos y la confianza que me brindó al ser mi tutor de la Especialidad.

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma, por abrirme las puertas de su grupo de investigación.

A la Maestra Isaura Yáñez Noguez, por el apoyo que nos brinda para mantener un buen trabajo en equipo.

Y a todo el personal del Instituto de Ingeniería por facilitarnos los medios para poder seguir con nuestros proyectos.

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del

09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	12
3. HIPÓTESIS	12
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	13
5. MARCO TEÓRICO	14
5.1 BIOCOMBUSTIBLES	14
5.2 PANORAMA NACIONAL EN EL USO DE BIOCOMBUSTIBLES.....	15
5.3 MICROALGAS Y SU VIABILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES	16
5.4 COSECHA DE BIOMASA MICROALGAL.....	18
5.5 SEDIMENTACIÓN	21
5.5.1 TIPOS DE SEDIMENTACIÓN	22
5.5.2 SEDIMENTADORES DE ALTA TASA.....	25
5.6 DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA	26
5.6.1 CARGA SUPERFICIAL	26
5.6.2 VELOCIDAD PROMEDIO DE FLUJO EN LAS PLACAS.....	28
5.6.3 RELACIÓN SEPARACIÓN ENTRE PLACAS-LONGITUD.....	29
5.6.4 PROFUNDIDAD	30
5.6.5 PLACAS INCLINADAS.....	31
5.6.6 DESAGÜE.....	32
5.6.6 FACTORES QUE INFLUYEN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN	33
6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	34
6.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	34
6.1.1 MUESTREO DE AGUA RESIDUAL.....	35
6.1.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL	36
6.1.3 CULTIVO DE SCENEDESMUS OBLIQUUS EN AGUA RESIDUAL	36
6.1.4 MONITOREO DE NUTRIENTES Y ELABORACIÓN DE CURVAS DE CRECIMIENTO.....	37
6.2 ENSAYOS DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	38
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
7.1 CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS	39
7.2 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	40

7.3 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA	44
7.4 CONSTRUCCIÓN.....	51
7.4.1 MATERIALES.....	51
7.4.1 PRESUPUESTO DE OBRA	55
8. CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS.....	57
ANEXO A	61
A1. CURVAS DE CRECIMIENTO MICROALGAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES.....	61
A2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL CONSORCIO MICROALGAL.	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ETAPAS DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS. ADAPTADO DE ARIAS, 2013.....	18
FIGURA 2. DIAGRAMA DE MÉTODOS DE COSECHA MICROALGAL. ADAPTADO DE BARROS, A., 2014.	19
FIGURA 3. CURVA TÍPICA DE SEDIMENTACIÓN (ADAPTADA DE METCALF & EDDY, 2004)	22
FIGURA 4. DIAGRAMA DE COLECTA DE UNA PARTÍCULA AL AÑADIR UNA PLACA HORIZONTAL	25
FIGURA 5. TRAYECTORIA DE UNA PARTÍCULA EN PLACAS PARALELAS INCLINADAS.....	27
FIGURA 6. RENDIMIENTO DE UN SEDIMENTADOR CON INCLINACIÓN DE MÓDULO DE 0° (YAO, 1970).....	29
FIGURA 7. RENDIMIENTO DE UN SEDIMENTADOR CON INCLINACIÓN DE MÓDULO DE 20° Y 40° (YAO, 1970)	30
FIGURA 8. CORRIENTES TÉRMICAS	33
FIGURA 9. DIAGRAMA DE LA PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.....	34
FIGURA 10. DIAGRAMA DE LA SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.	35
FIGURA 11. DIAGRAMA DE LA TERCERA ETAPA EXPERIMENTAL.	35
FIGURA 12. CULTIVO POR LOTE DE <i>S. OBLIQUUS</i> EN AGUA RESIDUAL EN REACTOR DE ALTA TASA.	37
FIGURA 13. CURVA DE CRECIMIENTO DEL CONSORCIO MICROALGAL (<i>SCENEDESMUS OBLIQUUS</i> , ESPECIE DOMINANTE) EN AGUA RESIDUAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES DURANTE LAS ETAPAS DE CULTIVO.	39
FIGURA 14. CURVAS DE SEDIMENTACIÓN PARA CULTIVOS CON 8 DÍAS DE TRH.....	41
FIGURA 15. CURVAS DE SEDIMENTACIÓN PARA CULTIVOS CON 15 DÍAS DE TRH.....	42
FIGURA 16. CURVA DE CRECIMIENTO MICROALGAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES PARA EL CULTIVO 1	61
FIGURA 17. CURVA DE CRECIMIENTO MICROALGAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES PARA EL CULTIVO 2	61
FIGURA 18. CURVA DE CRECIMIENTO MICROALGAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES PARA EL CULTIVO 3	62
FIGURA 19. GRÁFICA DE CURVA DE SEDIMENTACIÓN PARA LOS VALORES DE ALTURA- TIEMPO REGISTRADOS	65
FIGURA 20. TRAZO DE LA LÍNEA DE TENDENCIA PARA LA CURVA DE SEDIMENTACIÓN	65
FIGURA 21. TRAZO DE TANGENTES EN LA ZONA DE SEDIMENTACIÓN DISCRETA Y ZONA DE COMPRESIÓN	68
FIGURA 22. LOCALIZACIÓN DEL PUNTO CRÍTICO EN LA CURVA DE SEDIMENTACIÓN	70

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE COSECHA UTILIZADOS PARA LA RECUPERACIÓN DE BIOMASA MICROALGAL.	20
TABLA 2. EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE COSECHA.....	21
TABLA 3. TIPOS DE SEDIMENTACIÓN QUE INTERVIENEN EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL.	24
TABLA 4. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL	36
TABLA 5. CUADRO CON LOS RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DISCRETA A LOS 6 DÍAS DE CULTIVO	43
TABLA 6. CUADRO CON LOS RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN PARA LOS CULTIVOS ANALIZADOS.	43
TABLA 7. RESULTADOS DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN PARA DISTINTAS ESPECIES MICROALGALES	43
TABLA 8. VALORES DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA CIUDAD DE MÉXICO (CONAGUA).....	45
TABLA 9. EXTRACTO DE TABLA DE VISCOSIDADES A DISTINTAS TEMPERATURAS	46
TABLA 10. EXTRACTO DE TABLA DE DENSIDADES PARA DISTINTAS TEMPERATURAS.....	46
TABLA 11. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA.	49
TABLA 12. TABLA COMPARATIVA ENTRE UN SEDIMENTADOR CONVENCIONAL Y UNO DE ALTA TASA.....	51
TABLA 13. PRESUPUESTO DE OBRA DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA.....	55
TABLA 14. TABLA DE CONCENTRACIONES OBTENIDAS DE BIOMASA MICROALGAL	62
TABLA 15. REMOCIONES REGISTRADAS DE NITRÓGENO AMONICAL.....	62
TABLA 16. REMOCIONES REGISTRADAS DE NITRITOS	63
TABLA 17. REMOCIONES REGISTRADAS DE NITRATOS	63
TABLA 18. REMOCIONES REGISTRADAS DE ORTOFOSFATOS.....	63
TABLA 19. VALORES DE ALTURA-TIEMPO RESGISTRADOS	64
TABLA 20. VECTORES DIRECTORES PARA LAS RECTAS TRAZADAS	68
TABLA 21. VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA TRAMO DE LA CURVA DE SEDIMENTACIÓN	69
TABLA 22. VALORES REGISTRADOS DE ALTURA-TIEMPO PARA LOS CULTIVOS 1, 2 Y 3 CON 8 DÍAS, CON CONCENTRACIONES DE BIOMASA MICROALGAL DE 480, 530, 465 [MG/L] RESPECTIVAMENTE	70
TABLA 23. VALORES REGISTRADOS DE ALTURA-TIEMPO PARA LOS CULTIVOS 1, 2 Y 3 CON 15 DÍAS DE TRH, CON CONCENTRACIONES DE BIOMASA MICROALGAL DE 565, 630, 575 [MG/L] RESPECTIVAMENTE	71

RESUMEN

Durante las últimas décadas ha incrementado el estudio de las microalgas debido al amplio rango de aplicaciones que han sido asociadas a estos organismos. Las microalgas son consideradas como una importante fuente de aceites y otras biomoléculas útiles en la producción de biocombustibles. Como parte de este proceso de producción, se han desarrollado técnicas de cultivo microalgal en aguas residuales debido a la capacidad de remover nutrientes que ofrecen las microalgas, mientras que para la obtención de biomasa se deben seleccionar un método de cosecha que sea económicamente viable y eficiente.

En este trabajo se propone el diseño y la construcción un sedimentador de alta tasa para la cosecha de biomasa microalgal como parte de un proceso de producción de biocombustibles, utilizando como criterio de diseño la velocidad de sedimentación obtenida experimentalmente de un consorcio microalgal cultivado en agua residual.

En una primera etapa, se realizaron cultivos por lote en un reactor de alta (HRAP), de un consorcio microalgal (*Scenedesmus obliquus*, especie dominante) con dos tiempos de retención hidráulica (RTH, 8 y 15 días). Como medio de cultivo se utilizó agua residual doméstica, proveniente de la planta de tratamiento "Cerro del Agua", ubicada en Ciudad Universitaria. Se pudo registrar una concentración máxima de 0.63 [gSST/L] y porcentajes de remoción de nutrientes presentes en el agua (nitrógeno amoniacal, nitratos, ortofosfatos) mayores al 50%.

Posteriormente, se realizaron ensayos de sedimentación con la biomasa obtenida de los cultivos a los dos TRH (8 y 15 días), para obtener la velocidad de sedimentación y así poder evaluar la condición que representara los tiempos de cosecha más cortos. Los resultados arrojaron que con TRH de 15 días se obtiene la biomasa microalgal con la velocidad de sedimentación más alta, 1.89 [m/día], la cual fue utilizada como parámetro de diseño del sedimentador de alta tasa.

Como resultado final de este trabajo, se obtuvieron las bases de diseño y construcción de un sedimentador de alta tasa con placas inclinadas de 2[m³] de capacidad, incluyendo la memoria de cálculo, los planos de diseño, la selección de materiales y presupuesto de construcción.

ABSTRACT

During the last decades, the study of microalgae has increased due to the wide range of applications that have been associated with these organisms. Microalgae are considered an important source of oils and other biomolecules useful in the production of biofuels. As part of this production process, microalgal cultivation has been developed in wastewater due to their ability to remove nutrients. To obtain biomass from the aqueous media, an efficient, viable and economical harvest method must be selected.

In this work, the design and construction of a high-rate sedimentation tank for microalgal biomass harvesting is proposed as part of a biofuel production process, using as design criteria the sedimentation rate of a microalgal consortium cultivated in wastewater, obtained experimentally.

In a first stage, microalgae consortium (*Scenedesmus obliquus*, dominant species) were cultivated in a high rate algal pond (HRAP) in batch mode, with two hydraulic retention times (HRT, 8 and 15 days). As a culture medium, domestic wastewater was used, from "Cerro del Agua" treatment plant, located at UNAM. It was possible to record a maximum concentration of 0.63 [gTSS/L] and percentages of nutrients removal (ammoniacal nitrogen, nitrates, orthophosphates) greater than 50%.

Subsequently, sedimentation tests were performed, with the biomass obtained from the cultures at the two HRT (8 and 15 days), to obtain the sedimentation rate and thus be able to evaluate the condition that represented the shortest harvest times. According to the results obtained, the highest sedimentation velocity was 1.89 [m/day] with a HRT of 15 days. These data were used to design a high-rate sedimentation tank.

Finally, the bases for the design and construction of a high-rate sedimentation tank with inclined plates of 2 [m³] capacity, include calculation memory, design plans, material selection and budget of building.

1. INTRODUCCIÓN

El desabasto de combustibles a nivel mundial como consecuencia de la sobreexplotación de las fuentes convencionales ha traído como consecuencia incrementos en el precio del petróleo y el deterioro de la calidad del aire. El calentamiento global asociado a las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ha provocado aumento en la temperatura del aire y del océano, el deshielo de glaciares y nivel del mar, etc. (Garibay-Hernández, 2009).

Ante esta problemática, se han explorado nuevas alternativas dentro de las cuales destacan los biocombustibles, con características más amigables para el ambiente. Se ha propuesto el uso de biomasa microalgal de tercera generación con alto contenido energético como materia prima para producirlos, debido a que esta no compite con la de origen alimenticio (Brennan & Owende, 2010). El proceso de producción de un biocombustible de origen microalgal, incluye una primera etapa de cultivo y cosecha de microalgas. En cuanto a la cosecha, la centrifugación y la floculación son métodos eficientes, pero al mismo tiempo son costosos; en general se ha estimado que esta etapa puede representar entre 30 y 35% del costo total de producción (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

La sedimentación es una operación unitaria utilizada en el tratamiento de aguas residuales y que puede ser aplicada para separar microalgas por gravedad (Chen, Yeh, Aisyah, Lee, & Chang, 2011). La densidad, el tamaño de las algas y la velocidad de sedimentación son parámetros que influyen en el proceso de sedimentación de las partículas y por lo tanto en la recuperación de la biomasa microalgal (Brennan & Owende, 2010). El proceso se lleva a cabo en tanques de sedimentación con diferentes configuraciones, los cuales son diseñados en función del tipo de fluido y material a separar. (Uduman, Qi, Danquah, Forde, & Hoadley, 2010). Existen sedimentadores rectangulares utilizados principalmente para separar partículas densas y grandes; sedimentadores circulares, adecuados para los procesos que van acompañados de una etapa de floculación, y los sedimentadores laminares o de alta tasa que han surgido como una alternativa para conseguir una mayor área de sedimentación en un menor espacio (Rodríguez et al., 2006).

El principal factor en el diseño de un sedimentador es la velocidad de sedimentación de las partículas de interés, en el caso de este estudio, las microalgas. Durante el tratamiento

de agua es común asumir que las partículas sedimentan de acuerdo con la Ley de Stokes, dicha ley menciona que las células alcanzan rápidamente la velocidad terminal de caída cuando la fuerza de fricción se ha convertido igual a la fuerza gravitatoria neta. Esta Ley tiene como inconveniente que solo se aplica para partículas esféricas, mientras que la mayoría de las microalgas son morfológicamente más complejas. Es por ello que se deben considerar otros métodos para estimar la velocidad de sedimentación como parte de diseño de un sedimentador.

En este trabajo se lleva a cabo el diseño y construcción de un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas para la cosecha de biomasa microalgal tomando como criterio de diseño la velocidad de sedimentación determinada experimentalmente de acuerdo con el método propuesto por Talmage y Fitch (1955). La sedimentación está siendo considerada como parte de un proceso de producción de biocombustibles y con la cual se busca concentrar y/o cosechar la biomasa de un consorcio de microalgas cultivadas en agua residual.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sedimentador de alta tasa para la cosecha de biomasa microalgal como parte de un proceso de producción de biocombustibles, utilizando como criterio de diseño la velocidad de sedimentación obtenida a partir de ensayos experimentales con un consorcio microalgal cultivado en agua residual.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Llevar a cabo el cultivo de un consorcio microalgal (*Scenedesmus obliquus*, especie dominante) en un reactor por lote de alta tasa y utilizando agua residual como fuente de nutrientes.

Evaluar el efecto del tiempo de retención hidráulico del cultivo del consorcio microalgal en la velocidad de sedimentación de la biomasa.

Llevar a cabo el diseño de un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas tomando en cuenta la velocidad de sedimentación experimental y el rendimiento de la biomasa cosechada.

Establecer las bases de construcción de un sedimentador de alta tasa de 2 [m³] de capacidad, considerando la selección y costos de material y los requerimientos de instalación en una planta piloto.

3. HIPÓTESIS

Los cultivos de microalgas con mayores tiempos de retención hidráulico, presentarán una mayor velocidad de sedimentación y podrán ser cosechadas de manera eficiente en un reactor de alta tasa para su posterior aprovechamiento en la producción de biocombustibles.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

Se utilizó un consorcio microalgal conteniendo *Scenedesmus obliquus* como especie dominante, previamente adaptado para su crecimiento en agua residual de la Planta de Tratamiento de Ciudad Universitaria, Cerro del Agua.

Las microalgas fueron cultivadas en un reactor de alta tasa de 28 [L] de capacidad bajo condiciones de operación previamente establecidas.

La velocidad de sedimentación fue determinada considerando la sedimentación natural de las microalgas y utilizando el método de Talmage y Fitch escala laboratorio.

El diseño considera un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas de 2m³ de capacidad y la velocidad de sedimentación determinada experimentalmente.

La construcción del sedimentador tiene como alcance la selección, cotización y adquisición del material, así como la supervisión de la etapa constructiva.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos que se obtienen de biomasa obtenida a partir de plantas, residuos de la agricultura, actividad forestal o desechos industriales. Podemos obtenerlos en estado sólido, tales como cáscaras de frutos secos o leña, en estado líquido, biodiésel y bioetanol, o en estado gaseoso obtenidos a partir de la descomposición de la materia orgánica como es el caso del biogás. Los biocombustibles se clasifican de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos (Álvarez, 2009).

Los de primera generación utilizan insumos de procedencia agrícola, plantas alimenticias, grasas animales y desperdicios sólidos orgánicos; presentan un alto contenido de azúcares y aceites como el jugo de caña, aceite de coco, cacahuete, entre otros. Para su producción se emplea tecnología convencional como la fermentación para obtener etanol, metanol y n-butanol; transesterificación con lo que se obtiene biodiesel y digestión anaerobia cuyo producto será biogás. Como ventajas presentan la facilidad en su procesamiento y una baja emisión de gases de efecto invernadero.

Los biocombustibles de segunda generación emplean como materia prima residuos agrícolas y forestales, tal como gabazo de caña de azúcar, paja de trigo y ramas secas de árboles. Se caracterizan por su alta densidad energética almacenada en la celulosa, debido que al romper sus enlaces químicos libera grandes cantidades de energía. La producción es más compleja, intervienen procesos como la sacarificación – fermentación y se obtiene bioetanol, biodiesel, metanol, entre otros. Tiene como principal ventaja que no hay desviación de alimentos provenientes de la agricultura para su obtención, aunque su producción no contribuye significativamente a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero (Álvarez, 2009; Sanderson, 2014).

Los combustibles de tercera generación utilizan biomasa con alta densidad energética de origen vegetal no alimenticia, de crecimiento rápido como los pastos perennes, algas verdes y verde-azules. Una ventaja de su producción es la captación de CO₂ durante su crecimiento y por lo tanto la disminución de gases en el efecto invernadero. El biodiesel y bioetanol son ejemplos de este tipo de biocombustibles.

5.2 PANORAMA NACIONAL EN EL USO DE BIOCOMBUSTIBLES

La emisión de CO₂, la disminución de las reservas de combustibles fósiles, y la volatilidad en el precio de los mismos, han sido elementos para considerar la incursión de los biocombustibles como parte de una estrategia de seguridad energética en diferentes países. Las disposiciones de diferentes protocolos internacionales en materia ecológica, en los cuales se propone el uso de biocombustibles para disminuir las afectaciones al ambiente, refuerzan las estrategias anteriormente mencionadas. Un ejemplo de esto es el protocolo de Kyoto, en el cual se propone la disminución del calentamiento global mediante el uso de toda esta gama de combustibles (Rosado, Córdoba, Vilaboa, & Martínez, 2016).

A nivel mundial se ha recurrido a la realización de cambios en la perspectiva de la seguridad energética. Dichos cambios están orientados a incluir temas como el cambio climático, la escasez del agua, y el manejo de los residuos, dentro de la planeación energética (SENER, 2015).

El interés de México por los bioenergéticos ha resultado principalmente en la elaboración de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos y su reglamento. Esta ley es la base para la producción y comercialización de bioenergéticas, impulsando la investigación, desarrollo e innovación tecnológica y la integración de los sectores público, privado y social (Zamarripa, 2011).

En México se ha buscado incursionar en el mercado de los bioenergéticos aprovechando las condiciones climáticas, de orografía, y a la amplia variedad de recursos agrícolas explotables que son favorables para la producción de biocombustibles (SAGARPA, 2013). El aprovechamiento de este potencial permitirá al país diversificar sus fuentes de energía, atenuar los impactos ambientales provocados por la producción, distribución y uso de tecnologías tradicionales para la generación de energía, y ampliar la base industrial en un área con alto valor agregado (SAGARPA, 2012).

La importancia del impulso a las energías renovables y la eficiencia energética no sólo estriba en reducir la dependencia en la utilización de los combustibles fósiles; también se han creado nuevas oportunidades económicas y se ha desarrollado un mercado energético totalmente diversificado y más amigable con el medio ambiente.(AMDEE, 2015).

5.3 MICROALGAS Y SU VIABILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes o eucariontes. Se pueden encontrar en hábitats diversos tales como aguas marinas, dulces, salobres, residuales o en el suelo, bajo una amplia diversidad de condiciones de temperatura, pH y disponibilidad de nutrientes. Las condiciones óptimas varían de una especie a otra. Se les considera responsables de la producción del 50 % del oxígeno y de la fijación del 50 % del carbono en el planeta. La diversidad de las microalgas es enorme y se clasificarán de acuerdo con su ciclo de vida, morfología, estructura celular y pigmentación. (Garibay et al., 2009; Johansen, 2012).

El cultivo de microalgas no es una actividad nueva, la producción masiva se llevó a cabo por primera vez en Alemania durante la II Guerra Mundial, para la obtención de lípidos. El uso de microalgas también ha sido encausado a otras aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales por su capacidad de utilizar los nutrientes de aguas residuales (principalmente nitrógeno y fósforo), la obtención de sustancias químicas finas, la producción de compuestos de interés farmacéutico y sobre todo por su alto contenido energética (AST ingeniería S. L., 2013; Gómez, 2007). La producción de bioenergía a partir de microalgas fue contemplada desde los años cincuenta, sin embargo, a partir de la crisis energética de 1975, el potencial económico de esta tecnología fue reconocido por varios países como EUA, Japón y Australia. La motivación para este cambio de postura es no solamente la necesidad de reducir el uso de derivados de petróleo y, consecuentemente, la dependencia de los países exportadores, sino también el reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (Arredondo & Vázquez, 1991; Huntley & Redalje, 2007).

La ventaja de utilizar microalgas como materia prima es que su biomasa y el contenido lipídico pueden ser manipulados en función de las condiciones de cultivo, que pueden ser tanto estímulos químicos como físicos. Los principales estímulos químicos son la concentración de nutrientes, la salinidad y el pH del medio de cultivo, mientras que los físicos son la temperatura, la intensidad luminosa y la agitación, ya sea mecánica o mediante aireación. Se ha detectado el uso de lípidos de microalgas para la producción de biodiesel, ya que es una alternativa que asegura satisfacer o reemplazar la demanda global de petrodiesel, con la posibilidad de obtener subproductos (proteínas, carbohidratos, biopolímeros, biogás, etc.) a partir de la biomasa residual (Garibay-Hernández, 2009; Loera-quezada et al., 2010).

El uso de microalgas en el proceso de producción de biocombustibles proporciona algunas ventajas sobre otras materias primas utilizadas: mayor eficiencia fotosintética comparada con plantas superiores ya que convierten entre el 3 y 8 % de la energía solar en biomasa, mientras que en plantas es de 0.5 %. Se estima que pueden producir mayor cantidad de biomasa y de aceite por hectárea que cualquier planta oleaginosa y no compromete la producción de comida y otros productos derivados de cosechas. Permite el aprovechamiento de territorios marginales e inclusive zonas no aptas para otras actividades productivas (agricultura, ganadería, industria y turismo), así mismo, los periodos de cultivo son más cortos permitiendo múltiples cosechas en comparación con otros cultivos que se cosechan una o dos veces por año (Chisti, 2008; Collet et al., 2011; Mata et al., 2010; Meng et al., 2009; Vyas, Verma, & Subrahmanyam, 2010).

Finalmente, la ventaja competitiva más importante de los biocombustibles que se obtienen a partir de microalgas, consiste en los rendimientos lipídicos por unidad de área considerablemente superiores a los que se obtienen con plantas oleaginosas, por ejemplo el rendimiento de biodiesel microalgal es de 12000 [l/ha] en lagunas de producción comparado con 1190 [l/ha] obtenidos de cultivos de canola (Chisti, 2008; Garibay-Hernández, 2009)

A pesar de que el biodiesel es una fuente de energía renovable para sustituir al combustible derivado del petróleo, el biodiesel producido a partir de los lípidos presenta dificultades en el proceso de producción, específicamente en el cultivo y la cosecha de las microalgas (Demirbas, 2011)

Un ejemplo de biocombustible de biomasa microalgal es el biodiesel, de forma general, el proceso de producción se resume en la Figura 1. El proceso inicia con el cultivo de especies de microalgas previamente seleccionadas para obtener biomasa con alta productividad de lípidos. Posteriormente se tiene una etapa de cosechado de las microalgas en la cual la biomasa obtenida es separada del medio de cultivo para posteriormente ser procesada (pretratamiento y la extracción de los lípidos) para finalmente obtener el biodiesel (Arias Peñaranda, Martínez Roldán, & Cañizares Villanueva, 2013).

En este trabajo se abordan los aspectos de cultivo de microalgas y cosecha de biomasa microalgal.

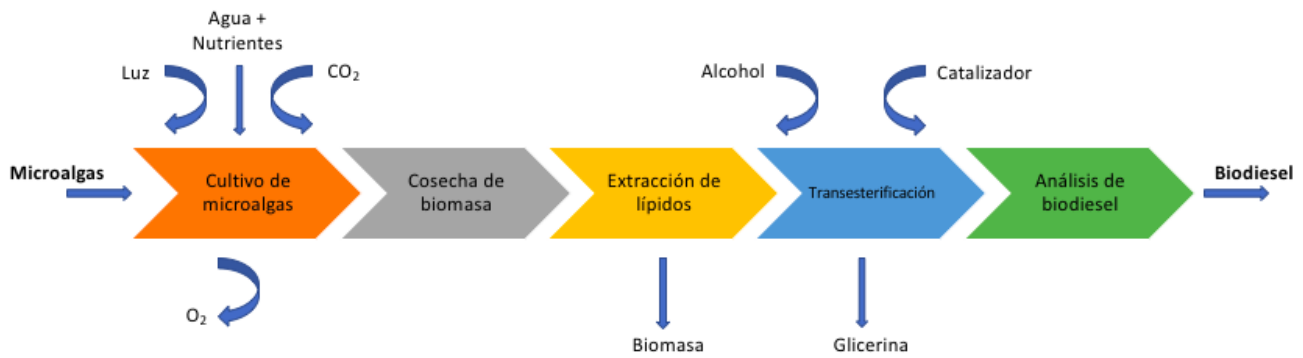


Figura 1. Etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir de microalgas. Adaptado de Arias, 2013.

5.4 COSECHA DE BIOMASA MICROALGAL

Un método de cosecha ideal debe ser efectivo para la mayoría de los géneros de microalgas y debería permitir altas concentraciones de biomasa, requiriendo costos moderados de operación, energía y mantenimiento (Uduman et al., 2010).

La selección del método de cosecha depende del producto final a obtener, particularmente de su valor y propiedades, tomando en cuenta que la biomasa microalgal deberá ser posteriormente procesada. Por lo que, los procedimientos de cosechado no deberán contaminar la biomasa además de que es deseable que el método de cosecha seleccionado permita el reciclaje del medio de cultivo utilizado. Finalmente, es importante tomar en cuenta el factor económico debido a que se puede encarecer el costo total de la producción, la cual representa entre un 20–30 % (Flotats & Bonmati, 2011; Uduman et al., 2010).

Para casi todas las aplicaciones, la cosecha microalgal comprende el método de concentración de dos pasos: espesamiento y desaguado. Estas etapas son cruciales para obtener una suspensión espesa de algas a partir de la suspensión inicial y de esta forma permitir los procesos posteriores a la cosecha. Como se puede observar en el diagrama en la Figura 2. Diagrama de métodos de cosecha microalgal. Adaptado de Barros, A., 2014., en la cosecha microalgal están involucrados distintos tipos de procesos como lo son: químicos, físicos, biológicos y eléctricos. Es muy común combinar dos o más métodos para obtener un mejor rendimiento de cosechado y menor costos (Barros, Gonçalves, Simões, & Pires, 2015)

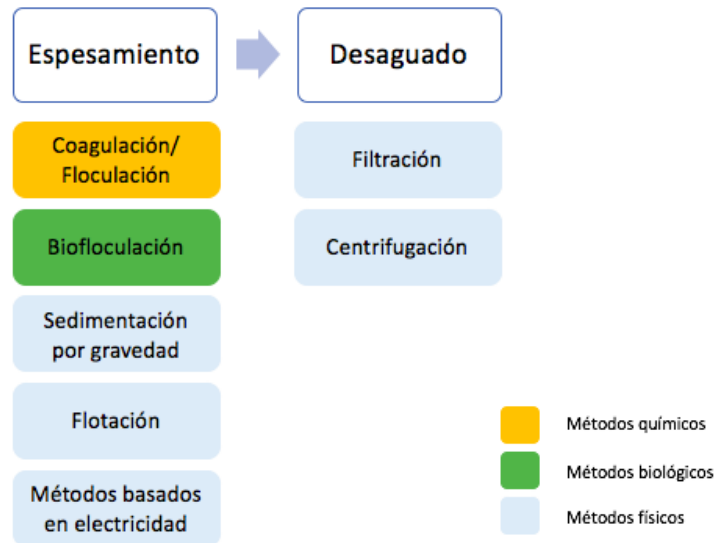


Figura 2. Diagrama de métodos de cosecha microalgal. Adaptado de Barros, A., 2014.

En la Tabla 1. Tipos de cosecha utilizados para la recuperación de biomasa microalgal. se presentan las ventajas y desventajas de los principales métodos utilizados para la cosecha microalgal.

Peralta et al. 2012 utilizó la metodología de análisis y síntesis para evaluar y seleccionar las alternativas de cosecha, realizando balances de masa y energía en cada uno de los sistemas seleccionados, y asignó a cada uno de los criterios de evaluación los siguientes valores: Alto (5 puntos), Medio (3 puntos), Bajo (1 punto). Los resultados de su análisis se muestran en la Tabla 2. Evaluación de diferentes métodos de cosecha

Como se puede observar en la Tabla 2, el método de cosecha mejor evaluado es la floculación seguido de la sedimentación por gravedad, pero, como se mencionó en líneas anteriores para este trabajo se utilizará la sedimentación debido a que se requiere un producto final no contaminado y que a su vez permita el reciclaje del medio del cultivo.

Para efecto de este trabajo solo nos enfocaremos en el método de sedimentación por gravedad como método de cosecha.

Tabla 1. Tipos de cosecha utilizados para la recuperación de biomasa microalgal.

Método de cosecha	Ventajas	Desventajas
Coagulación / Flocculación	<ul style="list-style-type: none"> • Método simple y rápido. • Bajo consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los flocculantes pueden ser caros y contaminar para la biomasa microalgal. • El reciclado del medio de cultivo es limitado.
Bioflocculación	<ul style="list-style-type: none"> • Método económico. • Permite reciclar el medio de cultivo. • No tóxico para la biomasa microalgal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Provoca cambios en la composición celular. • Posibilidad de contaminación microbiológica de la biomasa.
Sedimentación por gravedad	<ul style="list-style-type: none"> • Método simple y económico. • Energéticamente eficiente. • Útil para diversas especies de microalgas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos prolongados. • Posibilidad del deterioro de la biomasa. • Baja concentración de biomasa espesada.
Flotación	<ul style="list-style-type: none"> • Factible para aplicaciones de gran escala. • Método económico. • Bajo requerimiento de espacio. • Tiempos de operación bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente requiere el uso de flocculantes químicos. • No es factible para la cosecha de microalgas marinas.
Filtración	<ul style="list-style-type: none"> • Altas eficiencias de recuperación de células grandes como <i>Spirulina</i>. • Permite la separación de especies vulnerables a romperse. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es viable para especies de menor tamaño como <i>Chlorella</i> y <i>Scenedesmus</i>. • La posibilidad de incrustaciones/obstrucciones aumenta los costos operativos. • Las membranas deben limpiarse regularmente. • El reemplazo de las membranas y el bombeo representa el mayor costo.
Centrifugación	<ul style="list-style-type: none"> • Método rápido. • Alta eficiencia de recuperación. • Adecuado para casi todas las especies de microalgas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Método caro. • Altos requerimientos energéticos. • Adecuado solo para la recuperación de productos de alto valor. • Posibilidad de daño celular debido a las altas fuerzas presentes en el proceso. • No es viable para la recolección a gran escala.

Tabla 2. Evaluación de diferentes métodos de cosecha

Método de cosecha	Centrifugación	Floculación	Filtración	Sedimentación por gravedad	Flotación
Economía	Bajo	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Amabilidad con el medio ambiente	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
Seguridad	Medio	Alto	Alto	Alto	Bajo
Flexibilidad	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Controlabilidad	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
TOTAL	15	23	17	21	11

(Peralta Ruiz, Pardo Cárdenas, Canchila Romero, & Kafarov, 2012)

5.5 SEDIMENTACIÓN

En este apartado se presenta un resumen de los fundamentos teóricos más relevantes de la sedimentación.

A pesar del carácter rudimentario del proceso, la sedimentación funciona para varios tipos de microalgas y se perfila como el más eficiente en relación con su efectividad y costo de operación. Los biocombustibles al ser un producto final con valor agregado bajo en comparación con otros productos como el caso de los farmacéuticos, se recomienda la sedimentación por gravedad como método de cosecha de su materia prima, debido a que los costos de operación de este proceso son bajos. (Hernández-Pérez & Labbé, 2014; Molina Grima, Belarbi, Acién Fernández, Robles Medina, & Chisti, 2003; Rawat, Ranjith Kumar, Mutanda, & Bux, 2011)

Se entiende por sedimentación al proceso de remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión cuyo peso específico es mayor que el del agua. La sedimentación es un fenómeno físico y constituye una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Cuando ocurre la sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. Es común que se utilicen los términos clarificación y espesamiento para designar a la sedimentación, sin embargo, se hablará de clarificación

cuando hay un especial interés en el fluido clarificado y de espesamiento cuando el interés sea hacia la suspensión concentrada (Maldonado, 2010).

La finalidad del tratamiento por sedimentación es eliminar los sólidos fácilmente sedimentables y, por lo tanto, reducir el contenido de sólidos en suspensión del agua. Los tanques de sedimentación primaria pueden proporcionar el principal grado de tratamiento del agua residual o se pueden emplear como un paso previo al tratamiento posterior. Dichos tanques bien dimensionados y explotados con eficiencia eliminan entre el 50 y 70% de los sólidos suspendidos y entre el 25 y 40% de la DBO₅. (Metcalf & Eddy, 2003).

5.5.1 TIPOS DE SEDIMENTACIÓN

Las partículas en suspensión sedimentarán de forma distinta dependiendo de las características de la partícula y de su concentración. Se pueden producir cuatro tipos de sedimentación: discreta, floculenta, retardada o zonal y por compresión. Es frecuente que durante el proceso de sedimentación se observe uno de los tipos antes mencionados, pero también es posible que los cuatro tipos de sedimentación se presenten simultáneamente como se puede observar en la Figura 3. En la Tabla 2 se describen los cuatro tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento de agua residual (Maldonado, 2010; Metcalf & Eddy, 2003).

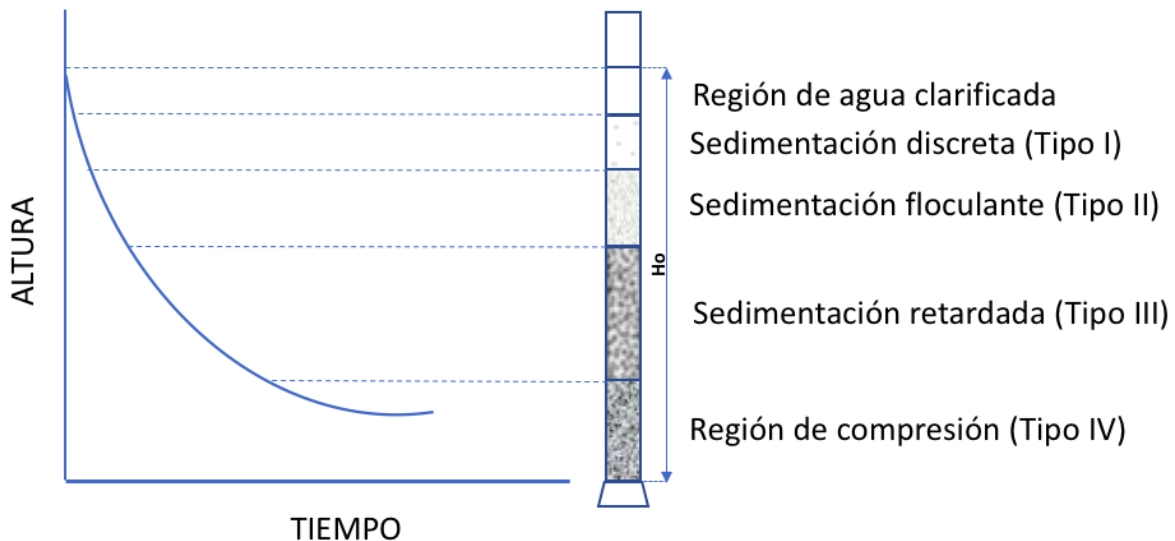


Figura 3. Curva típica de sedimentación (Adaptada de Metcalf & Eddy, 2004)

En los intentos por conocer el área superficial necesaria para un sedimentador se desarrollaron varios métodos a escala laboratorio. De acuerdo con los ensayos experimentales realizados por Talmage y Fitch (1955) y posteriormente estudiados por Andrew y Lenore (1996), para obtener la superficie necesaria de clarificación y espesamiento, al llenar una columna de altura H_0 con una suspensión de sólidos con una concentración uniforme C_0 , observaron que con el paso del tiempo e ir sedimentado las partículas presentes en el fluido se forma una interfase entre la zona de sedimentación discreta y la región de sedimentación retardada. En dicha interfase existe una concentración crítica que proporcionará un área requerida máxima; la concentración crítica puede obtenerse al trazar la bisectriz del ángulo formado por las tangentes a la zona de sedimentación discreta y a la zona de compresión de la curva de sedimentación. Al trazar una tangente en el punto de la concentración crítica se obtiene la velocidad de sedimentación que podrá ser utilizada como referente en los diseños de sedimentadores.

Tabla 3. Tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento del agua residual.

Tipo de fenómeno de sedimentación	Descripción	Aplicación/Situaciones en que se presenta
De partículas discretas (Tipo I)	Sedimentación de partículas con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas.	Eliminación de las arenas del agua residual.
Floculante (Tipo II)	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan o flocculan durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad.	Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la parte superior de los decantadores secundario. También elimina los flóculos químicos del de los tanques de sedimentación.
Retardada o zonal (Tipo III)	Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en la que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativamente fijas, y la masa de las partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.	Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.
Compresión (Tipo IV)	Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación solo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de dicha estructura. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.	Generalmente se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

2.5.2 SEDIMENTADORES DE ALTA TASA

Siempre que un líquido que contenga sólidos en suspensión y se encuentre en estado relativo de reposo, los sólidos de peso específico superior al del líquido tienden a depositarse y los de menor peso específico a ascender. Este principio básico se emplea en el diseño de sedimentadores para el tratamiento de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2004).

De acuerdo con la teoría, si se tiene un sedimentador de una altura **ho**, habrá partículas con velocidad de sedimentación crítica (v_{sc}) que serán removidas, pero si se coloca en el sedimentador una placa **C-C'** a una altura menor que **ho** se podría recoger partículas con una velocidad de sedimentación v_s menor que v_{sc} , como se muestra en la Figura 4.

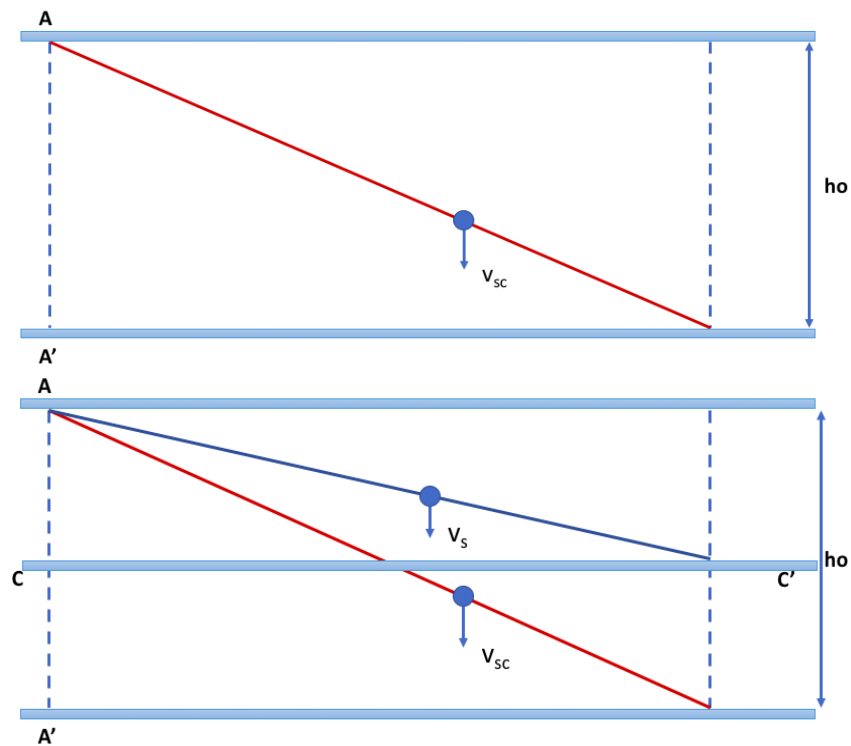


Figura 4. Diagrama de colecta de una partícula al añadir una placa horizontal

En 1904, Hazen publicó que la acción del tanque sedimentador depende de su área sedimentación y no de su profundidad, es por esto, que una subdivisión horizontal producirá una superficie doble para recibir sedimentos y duplicaría la cantidad de trabajo; tres de aquellas subdivisiones la triplicarían y así sucesivamente. Considerando la idea anterior, al agregar un mayor número de placas la eficiencia también incrementaría.

El problema que encontraron en la parte práctica estuvo relacionado con la limpieza. Al considerar una separación de placas muy reducida, la cantidad de agua que pasa en un tiempo dado será proporcionalmente mayor y por consiguiente la cantidad de lodos depositados también aumentará. Años después, Yao (1970) publicó las bases teóricas del cálculo de sedimentadores de alta velocidad o alta tasa, las cuales se siguen utilizando en la actualidad.

Los sedimentadores de alta velocidad o de alta tasa consisten esencialmente en una serie de tubos o láminas planas paralelas colocadas en un tanque con un ángulo θ de inclinación, de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. Esto permite obtener cargas superficiales de 4 a 10 veces mayores que las usadas en sedimentadores horizontales, la disminución de la altura de caída de la partícula y régimen de flujo laminar. Las eficiencias de remoción obtenidas son iguales o mejores que las de un sedimentador convencional. (Arboleda, 1973; Jiménez, B. et al., 1999; Maldonado, 2011).

El funcionamiento del sedimentador no se ve afectado por el tipo de módulo empleado (tubular o placas planas). Pero el costo de fabricación para módulos cuadrados es tres veces mayor que para las placas paralelas debido a la complejidad de su manufactura, por lo anterior se recomienda el uso de un módulo de placas paralelas. (Jiménez, B.; Buitrón, 1999). En este trabajo se propone el diseño de un sedimentador con estas características.

5.6 DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

A continuación, se presentan las bases de diseño de un sedimentador de alta tasa, con el cuál se propone llevar a cabo la cosecha de un consorcio de microalgas proveniente de dos reactores experimentales de cultivo con capacidad de 1.2m^3 cada uno, como parte de un proceso de producción de biocombustibles escala piloto.

5.6.1 CARGA SUPERFICIAL

La carga superficial de un sedimentador, $\frac{Q}{A}$ es igual a la velocidad crítica de sedimentación de las partículas (v_{sc}), pero este concepto de carga superficial solo se aplica a los sedimentadores de flujo horizontal por lo que no puede ser extendido a otros sistemas de sedimentación. En consecuencia, Yao (1970) consideró que el modelo de Camp necesitaba una generalización para poder aplicar el concepto de carga superficial a

los sedimentadores de alta tasa; por lo que concluyó que el parámetro que caracteriza el comportamiento en estos sedimentadores está dado por el valor de eficiencia (S) definido por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{v_s}{v_o} (\text{Sen } \theta + L \cos \theta) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- S : representa la eficiencia según el tipo de sedimentador
- v_s : es la velocidad de caída de la partícula suspendida $\left[\frac{cm}{s}\right]$
- v_o : es la velocidad promedio del flujo a través del sedimentador $\left[\frac{cm}{s}\right]$
- θ : es el ángulo de inclinación de las láminas
- L : es la longitud relativa, expresada como $\frac{l}{e}$; l es la longitud de las placas y e la separación entre ellas.

Como se observa en la **Error! Reference source not found.**, la ecuación a la que llegó Yao puede hallarse mediante relaciones geométricas de las componentes de la velocidad resultante que determina la trayectoria de la partícula (v_x y v_y) y la configuración que presentan las placas.

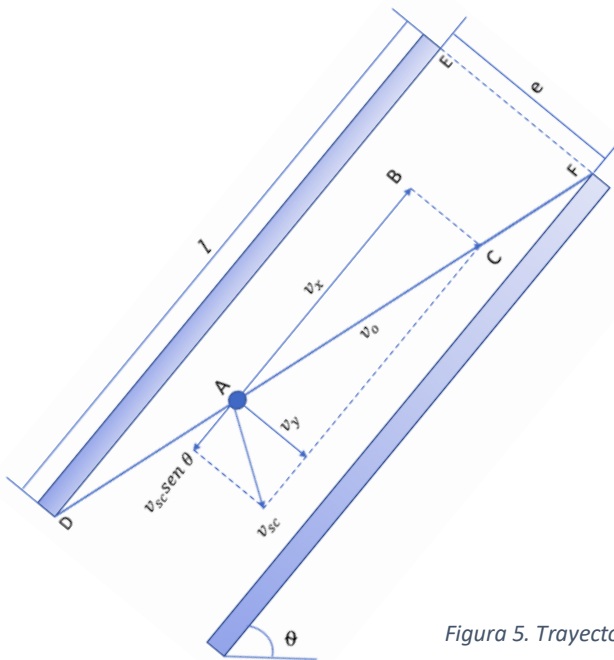


Figura 5. Trayectoria de una partícula en placas paralelas inclinadas

Para cada flujo existe un valor crítico de S llamado eficiencia crítica (S_c), donde cualquier partícula suspendida con un valor $S \geq S_c$ será removida. El valor de S_c para tubos

circulares es 4/3, para conductos cuadrados 11/8 y para bandejas abiertas o láminas paralelas, es igual a 1.

La velocidad crítica (v_{sc}) puede obtenerse con la Ecuación 2, permitiendo así el diseño de un sistema de alta tasa con una velocidad de sedimentación apropiada; q es la carga superficial equivalente.

$$v_{sc} = \frac{S_c v_o}{(\text{Sen } \theta + L \cos \theta)} = q \quad \text{Ecuación 2}$$

5.6.2 VELOCIDAD PROMEDIO DE FLUJO EN LAS PLACAS

La trayectoria que lleva una partícula en el interior de un canal formado por dos placas paralelas con una inclinación θ con respecto a la horizontal, dependerá de la velocidad media del fluido (v_o), que se obtiene con la Ecuación 3, y de la velocidad crítica de sedimentación de la partícula v_s , la cual representa la velocidad mínima a la que sedimentará la partícula.

$$v_o = \frac{Q}{Neb} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

- Q : es el caudal que pasará por las placas $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
- e : es la distancia perpendicular que existe entre las placas $[m]$
- b : el ancho que tendrán las placas $[m]$
- N : es el número de canales que tiene el sedimentador

En la práctica, conviene mantener un régimen laminar para evitar que se arrastren los sedimentos y la disminución de la eficiencia, es decir, que el número de Reynolds sea menor de 500 (flujo en transición) y preferentemente menor que 250 para garantizar el flujo laminar. Para obtener el valor del número de Reynolds se utiliza la Ecuación 4:

$$N_R = \frac{v_o e}{\nu} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

- v_o : es la velocidad promedio del flujo a través del sedimentador $\left[\frac{cm}{s} \right]$

ν : es la viscosidad cinemática en $\left[\frac{cm^2}{s}\right]$

e : es la distancia perpendicular que existe entre las placas [cm]

La viscosidad cinemática se expresa como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad, como se muestra en la ecuación 5:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

5.6.3 RELACIÓN SEPARACIÓN ENTRE PLACAS-LONGITUD

La relación entre la separación entre placas e y la longitud l se denomina longitud relativa L , tiene gran importancia en la eficiencia del sedimentador. Si la relación L es muy pequeña, cada celda trabajará como un sedimentador horizontal de baja velocidad. Si la relación aumenta, se incrementa v_{sc}/v_0 tiende a cero y la eficiencia se hace mayor (Arboleda, 1973).

Como se puede ver en las Figura 6 y 7, al disminuir el valor de L , el valor de $\frac{v_{sc}}{v_0}$ será mayor para cualquier ángulo considerado. Esto indica que, para partículas suspendidas con menores velocidades críticas de sedimentación, serán removidas completamente a medida que aumente la longitud relativa.

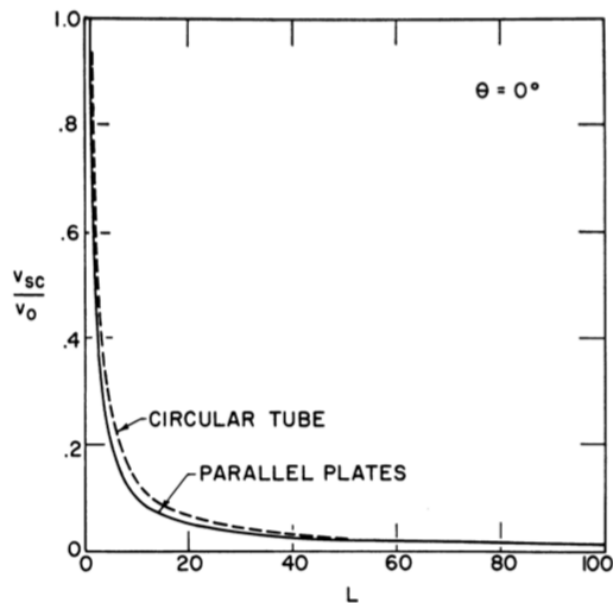


Figura 6. Rendimiento de un sedimentador con inclinación de módulo de 0° (Yao, 1970)

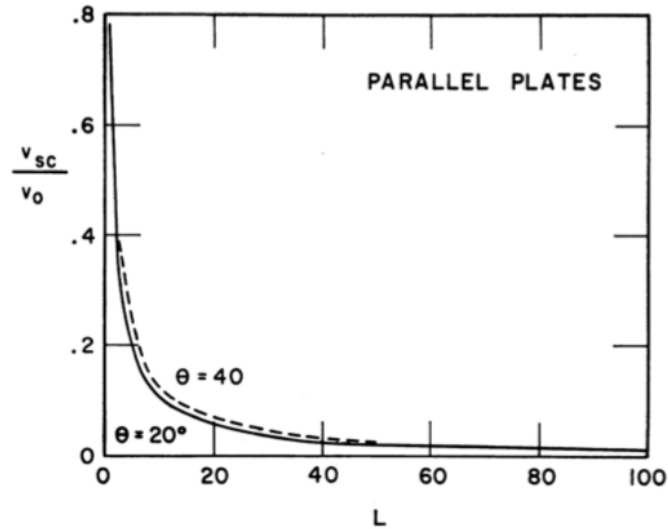


Figura 7. Rendimiento de un sedimentador con inclinación de módulo de 20° y 40° (Yao, 1970)

En ambas figuras se aprecia que la disminución en $\frac{v_{sc}}{v_0}$ cae apreciablemente después de que L alcanza el valor de 10 y se vuelve insignificante con valores mayores a 40. Se recomienda que el valor de L se encuentre preferentemente alrededor de 20 y menor a 40 (Yao, 1970).

5.6.4 PROFUNDIDAD

Teóricamente se ha visto que en el diseño de los sedimentadores no depende la profundidad, con lo cual, se puede decir que un sedimentador menos profundo sería el más recomendable debido a que sería el menos costoso, pero existen algunas limitantes que impiden la construcción de sedimentadores con profundidades pequeñas:

- No se puede incrementar la velocidad del flujo debido a que se podría resuspender las partículas sedimentadas.
- Al aumentar la profundidad, el efecto de las corrientes dentro del sedimentador se minimizan con lo cual se previene el efecto de resuspensión de partículas.

Para evitar la resuspensión y facilitar el deslizamiento de los sedimentos, se recomienda que el fondo del sedimentador tenga una pendiente al menos de 5 a 10% (OPS, 2005).

5.6.5 PLACAS INCLINADAS

Para disminuir el área requerida del tanque de sedimentación, una limitación en este trabajo, se optó por utilizar placas inclinadas en el sedimentador. El uso de las placas inclinadas se basa en la teoría que indica que el asentamiento de las partículas depende más del área de sedimentación que del tiempo de retención (Metcalf & Eddy, 2003).

Se pueden clasificar los sistemas de placas inclinadas en tres formas posibles respecto a la dirección del flujo del líquido con relación a la dirección de sedimentación de las partículas:

- Sedimentación a contracorriente: el agua residual fluye desde la base de las placas hacia la superficie, mientras que los sólidos suspendidos sedimentarán por fuerza de la gravedad en dirección contraria al flujo.
- Sedimentación co-corriente: el agua residual fluye desde la parte superior de las placas y los sólidos en suspensión desciende en la misma dirección hacia el fondo de las mismas.
- Sedimentación de flujo cruzado: la dirección del fluido es horizontal y no tiene interacción con la velocidad de sedimentación vertical.

5.6.5.1 INCLINACIÓN DE LAS PLACAS

La inclinación de las placas, es decir, el ángulo θ que forman con la horizontal, es otro parámetro que caracteriza el comportamiento de estos sedimentadores, por lo que se debe seleccionar una inclinación tal que asegure una continua y eficiente remoción de lodos. Usualmente se considera un ángulo de inclinación entre 45° y 60° respecto a la horizontal para asegurar la autolimpieza de las placas. Cuando el ángulo es superior a 60° la eficiencia disminuye, mientras que si se considera un ángulo menor a 45° los sólidos se acumularán en las placas. Se ha demostrado que la inclinación de 60° es la más indicada para la remoción de los sólidos en suspensión (Arboleda, 1973; Maldonado, 2011; Metcalf & Eddy, 2003).

5.6.5.2 LONGITUD DE LAS PLACAS

La longitud de las placas (L_p) se puede calcular, conociendo la velocidad promedio del flujo, y se obtiene con la siguiente expresión:

$$L_p = \frac{e(v_o - v_s \text{sen } \theta)}{v_s \text{cos } \theta} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

- v_s : es la velocidad de caída de la partícula suspendida $\left[\frac{m}{s}\right]$
- e : es la distancia perpendicular que existe entre las placas $[m]$
- v_o : es la velocidad promedio del flujo a través del sedimentador $\left[\frac{m}{s}\right]$

5.6.5.2 LONGITUD DEL MÓDULO DE PLACAS

Conociendo el número de placas a utilizar, se podrá calcular la longitud que tendrá el módulo con la siguiente expresión:

$$\text{Longitud del módulo} = l \text{cos } \theta + \left[\frac{N * e + (N + 1) * \text{espesor}}{\text{sen } \theta} \right] [m] \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde

- espesor* : hace referencia al espesor de las láminas inclinadas $[m]$
- N : es el número de canales en el sedimentador

5.6.6 DESAGÜE

Para calcular el área de la sección de salida que tendrán las tolvas, se podrá utilizar la siguiente expresión. Se recomienda que el tanque sea desocupado en un lapso de 30 a 60 minutos.

$$S = \frac{A}{4850t} \sqrt{d} [m] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- S : sección del desagüe $[m^2]$
- A : área superficial de sedimentación $[m^2]$
- t : tiempo de vaciado en horas

d : altura del agua sobre la boca del desagüe [m]

5.6.6 FACTORES QUE INFLUYEN EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

Por una parte, la concentración de materia suspendida modifica la forma de sedimentación de las partículas, a bajas concentraciones sedimentarán por caída libre y con altas concentraciones será sedimentación interferida.

Variaciones de temperatura producen corrientes térmicas (Figura 8), a su vez generan cortos circuitos hidráulicos. Un cortocircuito ocurre cuando un volumen de agua llega a través de un tanque en menos tiempo de lo esperado al tiempo de retención normal, lo que causaría una mala eliminación de los sólidos, la solución a este problema ha sido la instalación de mamparas que permitan difundir de manera uniforme a través del tanque o un deflector de entrada que permita dispersar el flujo del efluente (CONAGUA, 2013; Maldonado, 2010).

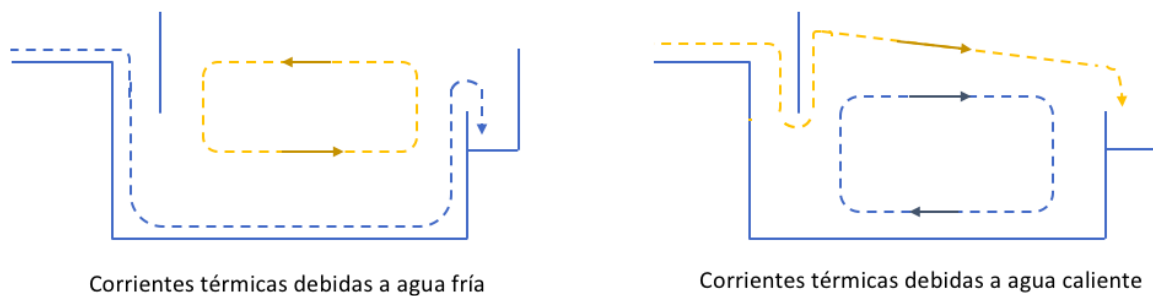


Figura 8. Corrientes térmicas

Los factores externos son los que tienen mayor influencia en la eficiencia del sedimentador tales como procesos previos al sedimentador, prácticas operacionales y factores ambientales.

La eficiencia de las operaciones unitarias anteriores al sedimentador, influye en el desempeño del sedimentador. Si el flujo es abastecido por bombas con ciclos de encendido y apagado, se pueden generar corrientes, provocando el aumento o disminución del tiempo de retención (CONAGUA, 2013).

Las bases teóricas antes descritas fueron utilizadas en este trabajo para el diseño de un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas para la cosecha de microalgas. A continuación, se presenta la metodología y resultados obtenidos del presente trabajo.

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología experimental se realizó en tres etapas principales.

En la primera etapa (Figura 9) se llevó a cabo el cultivo de microalgas en agua residual de la Planta de Tratamiento Cerro del Agua, de Ciudad Universitaria. Para ello el agua residual fue previamente filtrada y caracterizada por tener un control de contenido de nutrientes durante los ensayos. Para este estudio se utilizó un cultivo mixto de microalgas (*Scenedesmus obliquus*, especie dominante) previamente adaptado para su crecimiento en agua residual. Durante las diferentes etapas de cultivo se llevó a cabo el monitoreo de nutrientes y se obtuvieron las respectivas curvas de crecimiento.

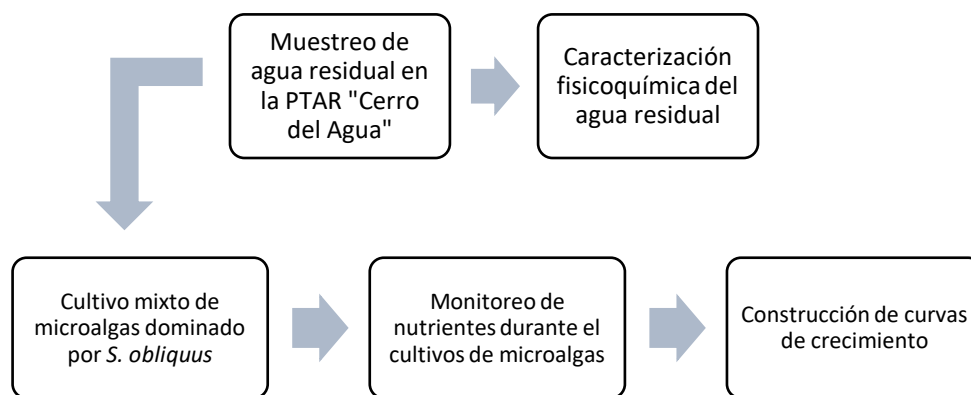


Figura 9. Diagrama de la primera etapa experimental

En la segunda parte (Figura 10), se realizaron los ensayos de sedimentación de acuerdo con la metodología propuesta por Talmadge & Fitch (1955), la cual consiste en colocar el fluido con las partículas en suspensión, cultivo microalgal en nuestro caso, en una probeta de 1L e ir midiendo en determinados intervalos de tiempo, la altura de las partículas que están sedimentando. Con las distintas parejas de valores (tiempo-altura) registradas se grafican las curvas respectivas y se realiza un análisis geométrico trazando tangentes a la curva de sedimentación, con lo cual se obtiene la velocidad de sedimentación. Experimentalmente se han obtenido rangos de sedimentación para microalgas entre 0.4 a 2.2 [m/día] (Gerardo, Van Den Hende, Vervaeren, Coward, & Skill, 2015).

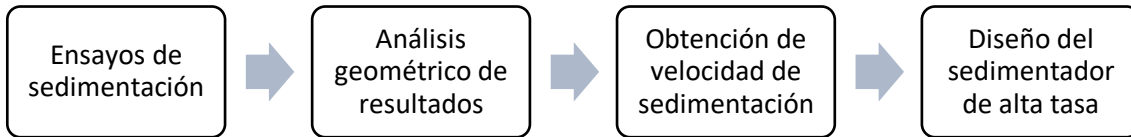


Figura 10. Diagrama de la segunda etapa experimental.

En la tercera etapa (Figura 11), con la velocidad de sedimentación obtenida, se procedió a determinar las dimensiones de un sedimentador de alta tasa (respetando los parámetros para el diseño que se recomiendan en la literatura) así como los requerimientos para su construcción.

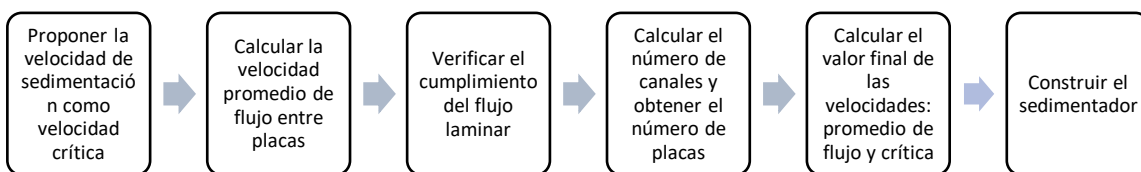


Figura 11. Diagrama de la tercera etapa experimental.

En los siguientes apartados se describirán en detalle los aspectos más importantes de la metodología y los procedimientos analíticos que se utilizaron en el estudio.

6.1.1 MUESTREO DE AGUA RESIDUAL

La toma muestra de agua se realizó siguiendo las recomendaciones de la Norma Mexicana NMX-AA-3-A980¹ en la cual se establece la metodología de muestreo de aguas residuales. El agua residual se obtuvo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro del Agua, ubicada en Ciudad Universitaria (UNAM). Se tomó una muestra por cada ensayo de sedimentación realizado y fueron colocadas en bidones de polietileno de 20 [L] previamente etiquetados.

Las muestras de agua fueron sometidas a un proceso de filtrado dividido en dos fases, con el fin de retirar los sólidos presentes en el agua residual. En la primera fase del filtrado se pasó el agua residual través de nube espuma colocada en conos Imhoff. En la segunda etapa se filtró nuevamente, pero al vacío con papel filtro Whatman número 40, cuyo diámetro de poro es de 8 [μm].

¹ NMX-AA-3-A980 NORMA MEXICANA “AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO”

6.1.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL

La determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual utilizada para el cultivo se realizó mediante el uso de los métodos analíticos enlistados en la Tabla 4. Métodos analíticos para la determinación de los parámetros del agua residual.

Tabla 4. Métodos analíticos para la determinación de los parámetros del agua residual

Parámetro	Método analítico	Técnica de la determinación
Sólidos Suspendidos Totales	Método 2540 D	Gravimetría. Sólidos secados a 105°C (APHA-AWWA-WPCF, 2005)
Nitratos	Método 8039 HACH	Colorimétrico. Método espectrofotométrico por reducción de cadmio (HACH)
Nitrógeno Amoniacal	Método titulométrico 4500 NH ₃ E	Titulométrico por destilación con NaOH y posterior titulación con H ₂ SO ₄ (BUCHI B-324)
Ortofosfatos (Fósforo reactivo)	Método 8178 HACH	Colorimétrico. Método de Aminoácido, medición en espectrofotómetro a 530 nm
Nitritos	Método 8507 HACH	Colorimétrico. Método de diazotización (HACH)

6.1.3 CULTIVO DE *SCENEDESMUS OBLIQUUS* EN AGUA RESIDUAL

Para cada uno de los ensayos de sedimentación se utilizó un consorcio de microalgas conteniendo *Scenedesmus obliquus* como especie dominante, la cual fue previamente identificada y acondicionada para su crecimiento en agua residual. El cultivo se llevó a cabo de acuerdo con las condiciones previamente determinadas por Rodríguez, 2017, las cuales se resumen a continuación. El cultivo se llevó a cabo en un reactor o laguna de alta tasa (HRAP: por sus siglas en inglés High Rate Algae Pond), Figura 12, con profundidad de 11 [cm] y volumen de trabajo de 28 [L], el cual fue operado por lote durante tiempos de retención hidráulico (TRH) de 8 y 15 días respectivamente, utilizando como medio de cultivo agua residual y como inóculo el consorcio microalgal antes mencionado, en una relación 50:50 (14 [L] de inóculo y 14 [L] de agua residual). Como fuente de iluminación está equipado con un panel LED que proporciona una radiación

fotosintéticamente activa en promedio de $62 \text{ } [\mu\text{mol fotones}/\text{m}^2\text{s}]$, y con fotoperiodos de 24:0 (luz : oscuridad).

Para favorecer el crecimiento de biomasa y evitar la sedimentación de la misma, la agitación fue provista por un sistema de paletas de acero inoxidable manteniendo una velocidad superficial de mezclado de $13 \text{ } [\text{cm}/\text{s}]$.



Figura 12. Cultivo por lote de S. obliquus en agua residual en reactor de alta tasa.

6.1.4 MONITOREO DE NUTRIENTES Y ELABORACIÓN DE CURVAS DE CRECIMIENTO

Se estimó el crecimiento de los cultivos determinando la concentración de biomasa seca medida como sólidos suspendidos totales, SST, en $[\text{mg}/\text{L}]$. También se llevó a cabo el monitoreo de los nutrientes presentes en agua residual durante el periodo de cultivo cada tercer día, tomando $100 \text{ } [\text{mL}]$ de muestra, la cual fue filtrada al vacío con papel filtro Whatman GF/A. Del filtrado se midieron los parámetros antes mencionados (nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y ortofosfatos).

Es importante mencionar que la realización de cada prueba analítica fue realizada por duplicado y además de que se llevó a cabo observaciones al microscopio de muestras del cultivo para asegurar la predominancia de las microalgas en estudio (*S. obliquus*).

6.2 ENSAYOS DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Para los ensayos de velocidad de sedimentación se realizaron cultivos por lote del consorcio microalgal en el reactor de alta tasa con tiempos de retención hidráulica (TRH), de 8 y 15 días, respectivamente. Para cada TRH se realizaron tres cultivos y con la biomasa obtenida, se llevaron a cabo los ensayos de velocidad de sedimentación por duplicado siguiendo el procedimiento de Talmadge & Fitch (1955).

De cada cultivo se tomaron muestras y se colocaron en dos probetas de 1 [L] al mismo tiempo. Paso seguido, se fueron tomando registros de la altura de recorrido de la interfase de las partículas que sedimentaban, con intervalos de 5 [min] durante la primera hora; después una lectura a los 15 min y por último en intervalos de 30 min la siguiente hora y media. Para tener una mayor visión del desarrollo de la prueba de sedimentación se colocaron lámparas LED de 20W detrás de las probetas.

Con los datos de altura de interfase registrados a los diferentes intervalos de tiempo, se procedió elaborar las curvas de sedimentación. En cada una de las curvas se identifica el punto donde se encuentra la concentración crítica, que indica el comienzo de la etapa de compresión. Dicha concentración es un parámetro clave en el diseño de instalaciones de sedimentación y permite calcular el área máxima requerida para lograr la sedimentación de los sólidos suspendidos. La velocidad de descenso de la interfase corresponde con la pendiente de la curva en cada instante de tiempo; la velocidad de sedimentación discreta (primera parte de la curva), raramente se toma en cuenta para regir el proceso de sedimentación debido a que es mucho mayor que la velocidad de la zona de compresión. Para obtener el punto crítico de la curva se traza la tangente de la región zonal (zona de sedimentación discreta) y la tangente a la región de compresión, en la unión de las tangentes se traza una bisectriz del ángulo formado por ambas rectas hasta tocar la curva de sedimentación. La unión de la bisectriz con la curva de sedimentación corresponde a la concentración crítica, posteriormente se traza una tangente en este punto, conociendo la pendiente a través de la ecuación de la recta sabremos cuál es la velocidad crítica.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 CULTIVO MIXTO DE MICROALGAS

En la Figura 13 se muestra un ejemplo de curva de crecimiento del consorcio microalgal en agua residual. Se puede observar que la fase de crecimiento más importante ocurre en las primeras 8 [hr] de TRH, posteriormente las microalgas entran en una fase estacionaria, durante la cual se tiene un ligero incremento hacia parte final de la etapa de cultivo (TRH: 15 días). La concentración microalgal máxima alcanzada a los 8 y 15 días de cultivo (TRH), fue 530 y 630 [mgSST/L], respectivamente.

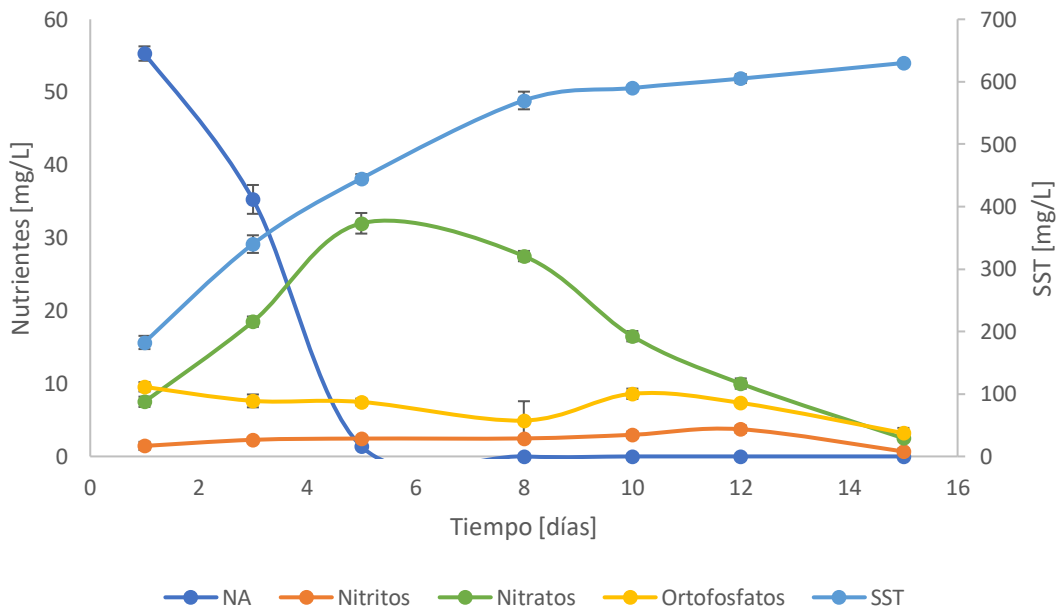


Figura 13. Curva de crecimiento del consorcio microalgal (*Scenedesmus obliquus*, especie dominante) en agua residual y remoción de nutrientes durante las etapas de cultivo.

Adicionalmente en la gráfica de la Figura 9, se muestra la remoción de nitrógeno (amoniaco, nitritos y nitratos) y ortofosfatos. En la primera etapa de cultivo se tiene un incremento en la concentración de nitratos, atribuible a la actividad de bacterias nitrificantes, posteriormente las microalgas los asimilan como fuente de nitrógeno y disminuyen; estos resultados son consistentes con lo obtenido por Rodríguez, 2017. En la sección de anexos se incluye la información completa de estos resultados.

7.2 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

En la sección de Anexo se puede consultar en detalle los registros obtenidos de los datos de altura de recorrido de la interfase de las partículas que sedimentan a los diferentes intervalos de tiempos para cada uno de los ensayos de sedimentación realizados.

A continuación, se presenta el análisis de las curvas resultantes para cultivos con TRH de 8 y 15 días respectivamente. Las curvas de sedimentación obtenidas se muestran en las Figuras 14 y 15. En estas curvas se pueden observar las tangentes trazadas en la zona de sedimentación discreta y en la zona de compresión, así como la bisectriz trazada para hallar el punto crítico.

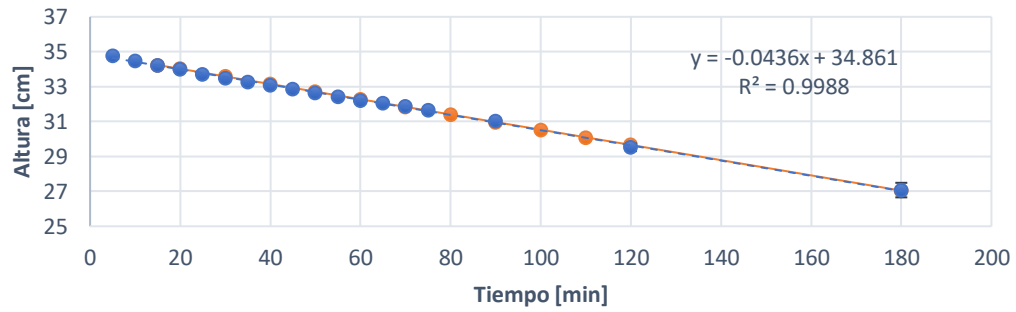
Para los tres cultivos de microalgas, con TRH de 15 días, las gráficas resultantes (Figuras 11) muestran un comportamiento típico de sedimentación (ver Figura 3. Curva típica de sedimentación). Por el contrario, en las gráficas del cultivo de los 8 días de TRH (Figura 10), se puede observar únicamente la primera parte de la curva, es decir, la zona de sedimentación discreta. Esto se debe a que los cultivos con menor TRH presentaron menor velocidad de sedimentación, razón por la cual ser necesitaría de más tiempo para poder completar el proceso de sedimentación. Debido que en este último caso no se observó el inicio de la zona de compresión, en estas curvas no fue posible determinar la concentración crítica, la cual es necesaria en el diseño de un sedimentador.

Del análisis geométrico de cada una de las curvas de sedimentación (8 y 15 días de TRH) se obtuvo los valores promedio de la velocidad (Tablas 5 y 6). El detalle dicho análisis se puede consultar en la sección de anexos.

Al comparar los resultados se puede observar que la velocidad de sedimentación a los 8 días TRH (0.682 [m/d]) es 2.7 veces menor que la obtenida en los cultivos de 15 días (1.89 [m/d]). La mayor velocidad de sedimentación de la microalgas esta asociada a la presencia de material extracelular, denominado sustancias poliméricas extracelulares (Mishra, Kavita, & Jha, 2011; Xiao & Zheng, 2016), las cuales se hacen presentes en las microalgas con mayor tiempo de cultivo.

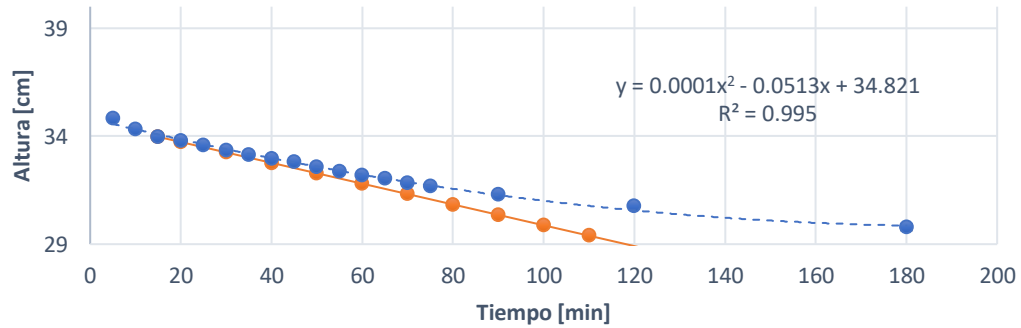
Para el caso de este estudio se seleccionó la velocidad obtenida con cultivos de 15 días de TRH para el dimensionamiento del sedimentador de alta tasa. Los resultados de velocidad de sedimentación obtenidos en el presente estudio son consistentes con lo reportado en la literatura para ciertas especies de algas (Tabla 7).

Cultivo 1



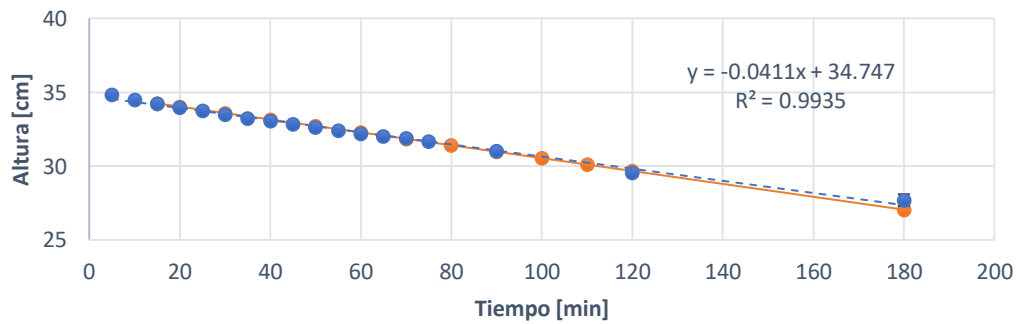
—●— Tangente zona de sedimentación discreta ● Cultivo 1 - - - - Linear (Cultivo 1)

Cultivo 2



—●— Tangente zona de sedimentación discreta ● Cultivo 2 - - - - Poly. (Cultivo 2)

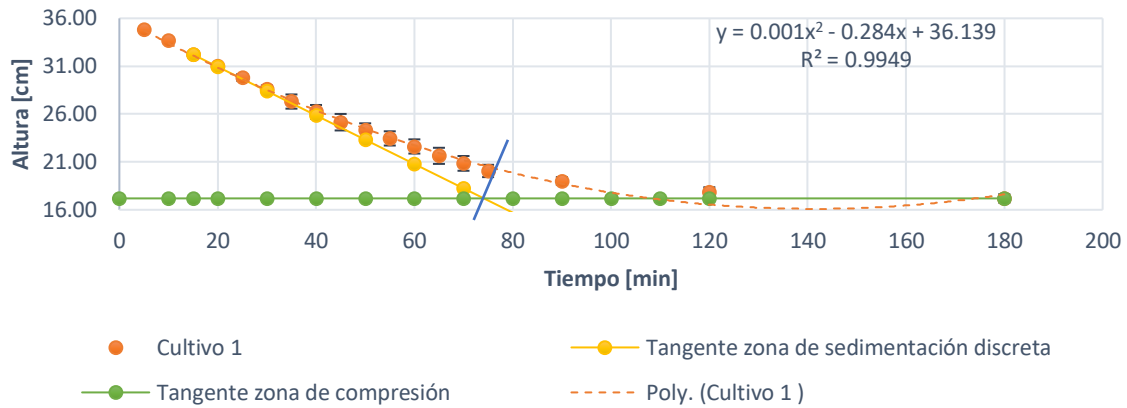
Cultivo 3



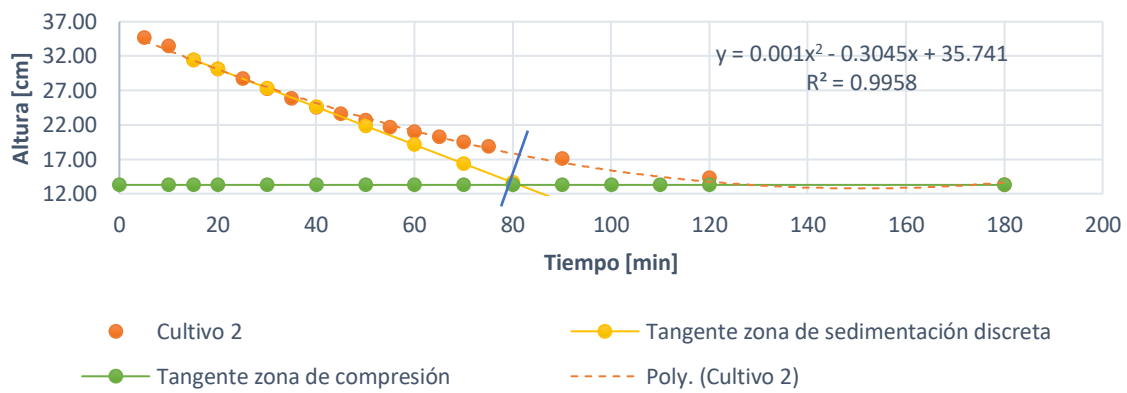
—●— Tangente zona de sedimentación discreta ● Cultivo 3 - - - - Linear (Cultivo 3)

Figura 14. Curvas de sedimentación para cultivos con 8 días de TRH

Cultivo 1



Cultivo 2



Cultivo 3

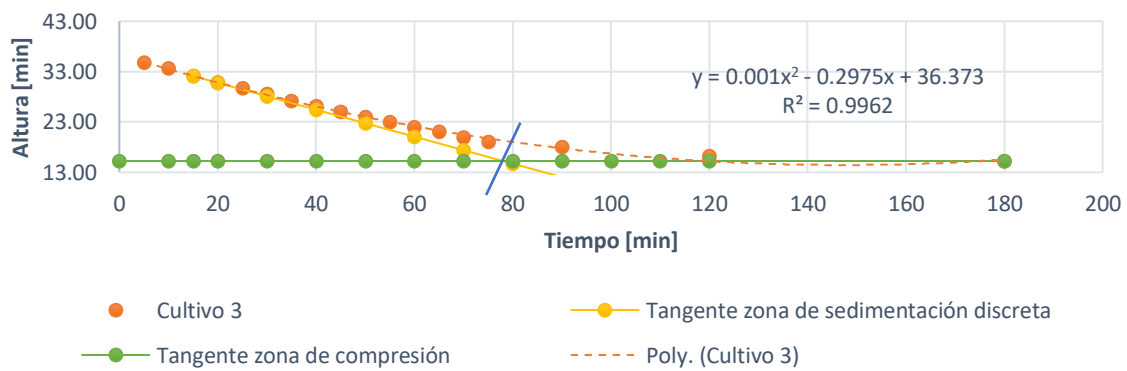


Figura 15. Curvas de sedimentación para cultivos con 15 días de TRH

Tabla 5. Cuadro con los resultados de la velocidad de sedimentación discreta a los 8 días de cultivo

Ensayo de sedimentación					
Cultivo 1		Cultivo 2		Cultivo 3	
Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2
vsd [m/día]	vsd [m/día]	vsd [m/día]	vsd [m/día]	vsd[m/día]	vsd [m/día]
0.636	0.655	0.711	0.707	0.688	0.694
vsd [m/día]	0.646	vsd [m/día]	0.709	vsd [m/día]	0.691
vsd promedio [m/día]			0.682		

vsd= velocidad de sedimentación discreta

Tabla 6. Cuadro con los resultados de la velocidad de sedimentación para los cultivos analizados.

Ensayo de sedimentación					
Cultivo 1		Cultivo 2		Cultivo 3	
Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2
vc [m/día]	vc [m/día]	vc [m/día]	vc [m/día]	vc [m/día]	vc [m/día]
1.915	2.022	1.891	1.930	1.800	1.780
vc [m/día]	1.968	vc [m/día]	1.910	vc [m/día]	1.790
vc promedio [m/día]			1.890		

vc= velocidad en el punto crítico

Tabla 7. Resultados de velocidad de sedimentación para distintas especies microalgales

Microalga	Medio de cultivo	Velocidad de sedimentación [m/día]	Referencia
<i>Skeletonema costatum</i>	Solución salina	1.22	(Peperzak, Colijn, Koeman, Gieskes, & Joordens, 2003)
<i>Rhizosolenia setigera</i>	Solución salina	0.89	(Peperzak et al., 2003)
<i>Coscinodiscus spp.</i>	Solución salina	1.9	(O'Brien, Waite, Alexander, Perry, & Neumann, 2006)
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	Solución salina	0.7-2.4	(Waite & Nodder, 2001)
Consorcio microalgal de <i>Scenedesmus ubliquus</i>	Agua residual	1.89	ESTE ESTUDIO

7.3 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

Como se mencionó al inicio de este documento, en este trabajo el diseño del sedimentador de alta tasa de placas inclinadas forma parte de un “Sistema piloto para el tratamiento de agua residual – lixiviado usando microalgas y ozono flotación”. Este sistema la sedimentación tiene como principal objetivo la cosecha y/o concentración de la biomasa microalgal, para su posterior aprovechamiento en la producción de biocombustibles. Para dicho sistema se estableció un caudal de diseño de 0.4 [L/s] y el cultivo de un consorcio microalgal (*Scenedesmus obliquus*, especie predominante) con una concentración del orden de 0.42 [g SST/L].

Para el dimensionamiento del sedimentador de alta tasa se tomaron en cuenta parámetros y criterios de diseño reportados en la literatura (Metcalf & Eddy, 2003; Romero, 1999; Yao, 2018). Uno de los más empleados es la carga superficial de sedimentación (q), que como se mencionó en apartados anteriores, es igual a la velocidad crítica de sedimentación (v_{sc}). La carga superficial mínima (q), que deberá tener el sedimentador y con ello lograr la remoción del consorcio microalgal, se puede calcular con la Ecuación 2.

$$v_{sc} = \frac{S_c v_o}{(\text{Sen } \theta + L \cos \theta)} = q \quad \text{Ecuación 2}$$

Para ello es necesario conocer la velocidad promedio (v_o) que tendrá el flujo del cultivo al pasar por las placas. Primero se propone que la velocidad de sedimentación obtenida experimentalmente (1.89 [m/día]), como la velocidad crítica de la partícula (v_{sc}). Posteriormente se fija una longitud de placas (l), para este estudio se fijó en un valor de 1.1 [m], tomando en cuenta que, a menor longitud de placas, mayor será la longitud del sedimentador.

Otro elemento por definir es la separación perpendicular de placa (e), que de acuerdo con lo reportado en la literatura es de 0.05 [m] y una inclinación de 60° debido a que es la más adecuada para la auto limpieza. Al tratarse de un sedimentador con un módulo de placas paralelas la eficiencia crítica será de 1. Con base en estos datos se puede obtener entonces la longitud relativa $L = \frac{l}{e}$;

$$L = \frac{1.1 [m]}{0.05 [m]} = 22$$

Finalmente, despejando la v_o de la Ecuación 2 y sustituyendo los valores respectivos, se obtiene un primer valor promedio de flujo (v_o).

$$v_o = \frac{v_{sc}(\text{Sen } \theta + L \cos \theta)}{S_c}$$

$$v_o = \frac{2.056 \times 10^{-5} \left[\frac{m}{s} \right] (\text{Sen } 60 + 1.1[m] \cos 60)}{1}$$

$$v_o = 0.000259 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Como se mencionó anteriormente, se debe garantizar un flujo laminar del fluido en las placas para evitar que las partículas sedimentadas se vuelvan a suspender en el medio, por lo que la velocidad promedio del flujo debe dar un número de Reynolds menor a 2500, lo cual se puede verificar con la Ecuación 4:

$$N_R = \frac{v_o e}{\nu} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la Ecuación 4 la viscosidad cinemática (ν) se puede calcular relacionando la viscosidad dinámica (μ) y la densidad del agua (ρ) a la temperatura media de la Ciudad de México. Esta última se puede estimar a partir de datos reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); la temperatura media anual de los últimos 10 años se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de temperatura media anual en la Ciudad de México (CONAGUA)

Entidad	Temperatura media anual											Promedio
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Ciudad de México	17.3	17.1	17.7	17.1	17.4	17	18.1	17.7	17.8	17.9	11.4	16.95

Al ser la temperatura media anual un valor decimal se recurrió a la interpolación lineal para encontrar el valor exacto de la densidad y viscosidad dinámica correspondiente, en las tablas 9 y 10 se muestran los valores obtenidos:

Tabla 9. Extracto de tabla de viscosidades a distintas temperaturas

Temperatura [°C]	Viscosidad dinámica [kg/ms]
16.00	0.001109
16.95	0.001082
17.00	0.001081

Tabla 10. Extracto de tabla de densidades para distintas temperaturas

Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]
16.00	999.03
16.95	998.87
17.00	998.86

Conociendo la densidad del agua y la viscosidad dinámica a 16.95 °C, se sustituyen en la ecuación 5, para obtener el valor del Número de Reynolds.

$$v = \frac{0.0010824 \left[\frac{kg}{ms} \right]}{998.8685 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

$$v = 1.08 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$N_R = \frac{000259 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.05 [m]}{1.08 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]}$$

$$N_R = 11.974$$

Con el Número de Reynolds obtenido se puede asegurar un flujo laminar para la velocidad de flujo dada.

Siguiendo con el procedimiento de diseño, el siguiente paso fue obtener el número de placas necesarias para que se cumpla con la velocidad promedio de flujo (v_0), previamente calculada. De la ecuación 5 se despeja N que indica el número de canales que deberá tener el sedimentador:

$$N = \frac{Q}{v_o e b} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$N = \frac{\frac{0.0004 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{2}}{0.000259 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.05 [m] * 1.1 [m]}$$

$$N = 19.27$$

El número de placas resultante es igual a $N + 1$ canales, por lo tanto, se necesitarán de un total de 20.27 placas; redondeando el número se utilizarán 21 placas.

Por otra parte, la longitud del módulo de placas inclinadas que tendrá el sedimentador se puede obtener con la Ecuación 7.

$$\text{Longitud del módulo} = l \cos \theta + \left[\frac{N * e + (N + 1) * \text{espesor}}{\text{sen } \theta} \right] [m] \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Longitud del módulo} = 1.1 [m] \cos 60^\circ + \left[\frac{20 * 0.05 [m] + (20 + 1) * 0.006 [m]}{\text{sen } 60^\circ} \right]$$

$$\text{Longitud del módulo} = 1.83 [m]$$

Es importante mencionar que para este proyecto se seleccionó un sedimentador a contracorriente, tomando en cuenta que este tipo de sedimentadores es de los más usados por el buen desempeño que tienen en el tratamiento de agua, al permitir que el agua clarificada se evacue por la parte donde se encuentra la menor cantidad de sólidos. Además, se consideró que el sedimentador estuviera dividido en dos secciones en la parte media interna por un par de mamparas que tendrán la función de estabilizar el flujo de entrada y permitir la difusión de manera uniforme del agua a la zona de sedimentación.

Conociendo el número de placas y canales se recalcula la velocidad promedio que llevará el flujo de cultivo entre dos placas utilizando la ecuación 3:

$$v_o = \frac{\frac{0.0004 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{2}}{20 * 0.05 [m] * 1.1 [m]} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$v_o = 0.00025 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Siguiendo el procedimiento, se debe verificar el número de Reynolds, al sustituir los valores en la ecuación 4:

$$N_R = \frac{00025 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.05 [m]}{1.08 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]}$$

$$N_R = 11.53$$

Finalmente, con el nuevo valor de v_o , se recalcula el valor de la carga superficial sustituyendo los valores en la ecuación 2:

$$v_{sc} = \frac{1 * 0.00025 \left[\frac{m}{s} \right]}{(\text{Sen } 60^\circ + 22 \cos 60^\circ)}$$

$$v_{sc} = 2.106 \times 10^{-5} \left[\frac{m}{s} \right] = 1.82 \left[\frac{m}{día} \right]$$

De los ensayos de sedimentación se obtuvo una velocidad v_s de $1.89 \left[\frac{m}{día} \right]$ y teóricamente una velocidad crítica v_{sc} de $1.82 \left[\frac{m}{día} \right]$. Recordando la teoría, todas las partículas que tengan una velocidad de sedimentación $v_s \geq v_{sc}$ serán removidas; por lo tanto, se asegura la remoción de las microalgas.

La sección de salida de la tolva se calculará con la Ecuación 8. El tiempo de vaciado se propondrá de 30 minutos, siguiendo las recomendaciones de Romero (1999). Al sustituir los valores respectivos se obtiene:

$$S = \frac{1.04 [m]}{4850 * 0.5 [horas]} \sqrt{1.139 [m]}$$

$$S = 0.00046 [m^2] = 4.57 [cm^2]$$

Considerando una sección cuadrada para la salida de la tolva, la medida por lado sería de 2.14 [cm].

El TRH para un sedimentador de alta tasa se puede obtener con la Ecuación 9. (Romero, 1999). Al sustituir los valores en la ecuación se obtiene:

$$TRH = \frac{l}{v_s} [s] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$TRH = \frac{1.1 [m]}{2.056 \times 10^{-5} \left[\frac{m}{s} \right]} = 50,298.49 [s] = 13.97 [horas]$$

En la Tabla 11 se muestran los parámetros obtenidos para el diseño del sedimentador de alta tasa, que servirán de base para el comienzo de la construcción.

Tabla 11. Parámetros de diseño para el sedimentador de alta tasa.

Parámetro	Valor
$Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$	0.0004
$v_s \left[\frac{m}{día} \right]$	1.89
$v_o \left[\frac{m}{día} \right]$	21.6
$v_{sc} \left[\frac{m}{día} \right]$	1.82
Reynolds	11.53
Número de Placas	21
Área superficial [m²]	2.96
TRH [horas]	13.97

En este trabajo se buscó optimizar el espacio y eficiencia de recuperación de la biomasa microalgal mediante el diseño de un sedimentador de alta tasa con un módulo interno de placas inclinadas. Para tener un marco de referencia, se realizó el cálculo del área teórica superficial requerida para un sedimentador convencional, por medio de la Ecuación de continuidad 10:

$$A_s = \frac{Q}{v_s} [m^2] \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde Q es el caudal de cultivo a tratar y v_s la velocidad de sedimentación de las microalgas, considerando la velocidad de $1.89 \left[\frac{m}{dia} \right]$, obtenida de forma experimental como se mencionó en apartados anteriores. De esta manera el área de sedimentación que requeriría un sedimentador convencional es:

$$A_s = \frac{0.0004 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{2.187 \times 10^{-5} \left[\frac{m}{s} \right]} = 18.29 [m^2]$$

Así mismo, se obtuvo el tiempo de retención hidráulico necesario para un sedimentador convencional con la ecuación 11:

$$TRH = \frac{A_s * H}{3600 * Q} [horas] \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde H es la profundidad del sedimentador

Suponiendo una profundidad mínima de 1.5 m, como lo recomienda en la literatura (Organización Panamericana de la Salud, 2005) se obtiene un TRH de:

$$TRH = \frac{19.46 [m] * 1.5[m]}{3600 * 0.0004 \left[\frac{m^3}{s} \right]}$$

$$TRH = 20.27 [horas]$$

Como se puede observar en la Tabla 12, el sedimentador de alta tasa ocupa una superficie 6.18 veces menor y un tiempo de retención hidráulico 1.45 menor, en comparación con un sedimentador convencional.

Tabla 12. Tabla comparativa entre un sedimentador convencional y uno de alta tasa.

Parámetro de diseño	Sedimentador convencional	Sedimentador de alta tasa
Área superficial [m ²]	18.29	2.96
Tiempo de Retención Hidráulico [horas]	20.27	13.97

7.4 CONSTRUCCIÓN

La construcción se realizará con ayuda del personal del Laboratorio de Diseño Mecánico y Manufactura Avanzada del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

7.4.1 MATERIALES

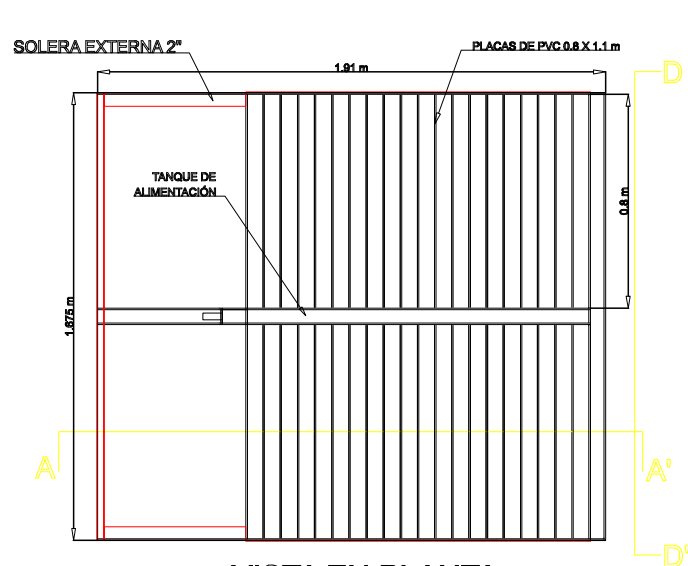
Los materiales para la construcción del sedimentador debían facilitar el armado, un fácil desmontaje y sobretodo la visualización el proceso de sedimentación debido a que se utilizará con fines didácticos.

Después de evaluar los materiales cotizados, se decidió que las paredes del sedimentador se construyeran con placas de acrílico transparente y PVC blanco, ambos de 6 [mm] de espesor.

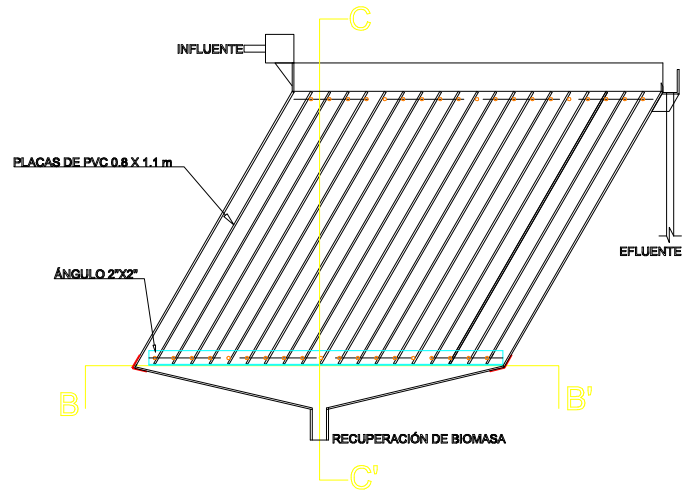
Por otra parte, el módulo de placas inclinadas será construido con placas de PVC blanco de 6 [mm], con dimensiones de 0.8 x 1.1 [m]. Las placas se colocarán sobre un ángulo de acero inoxidable de 2x2", la separación de 5 [cm] que habrá entre cada placas, se logrará con tornillos de acero inoxidable de ¼" x 2 ½"

Las placas se unirán con pegamento y serán reforzadas por solera de acero inoxidable de 2".

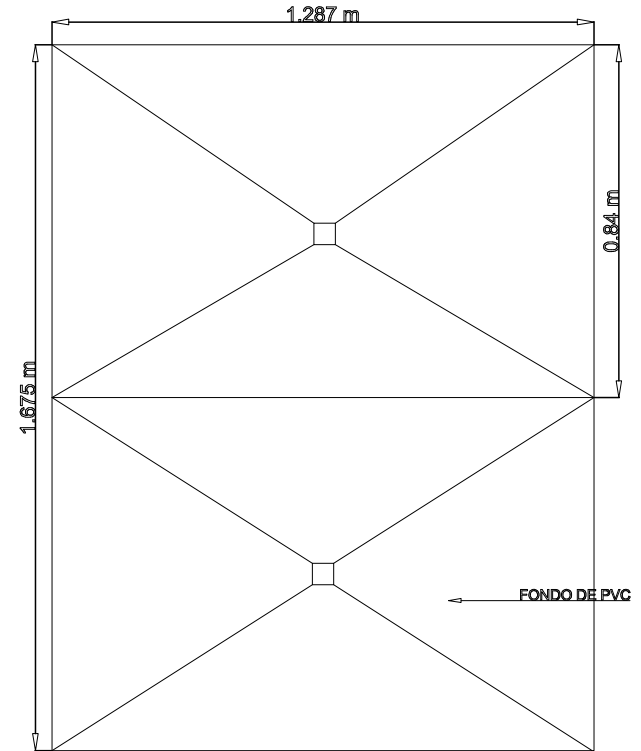
En los siguientes planos se puede observar el diseño del sedimentador de alta tasa, con base a los parámetros calculados, además se indican los materiales a utilizar para su construcción.



VISTA EN PLANTA



VISTA LATERAL CORTE A-A'



VISTA EN PLANTA
CORTE B-B'



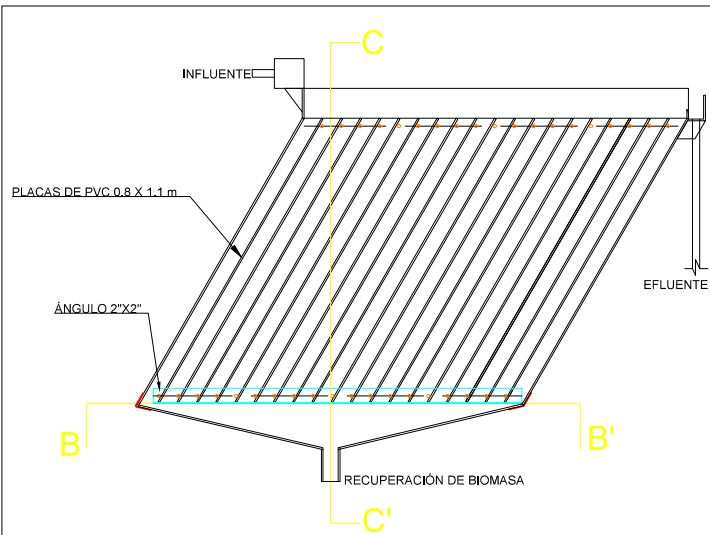
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

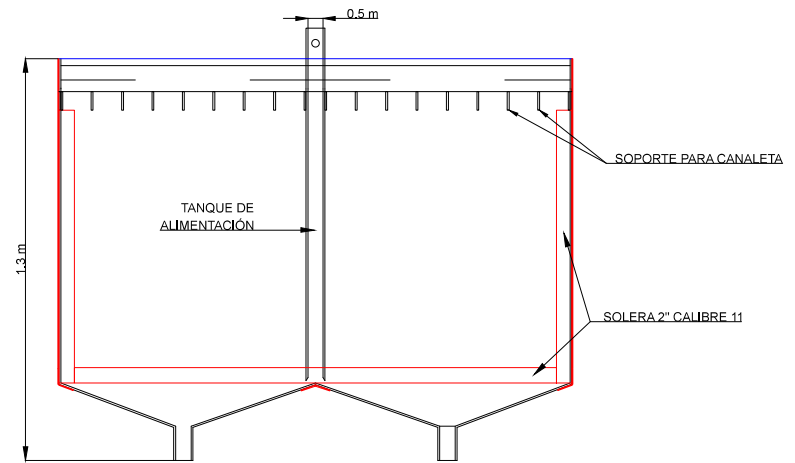
JEFE DEL PROYECTO

PLANTA DE CIENCIAS POLÍTICAS

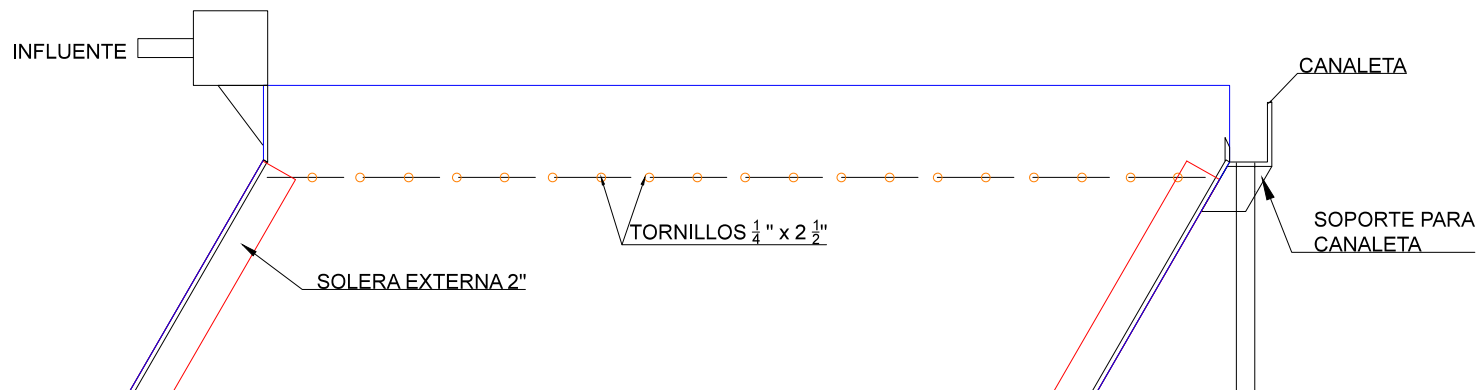
NOMBRE DEL PROYECTO



VISTA LATERAL CORTE A-A'



VISTA FRONTAL CORTE D-D'



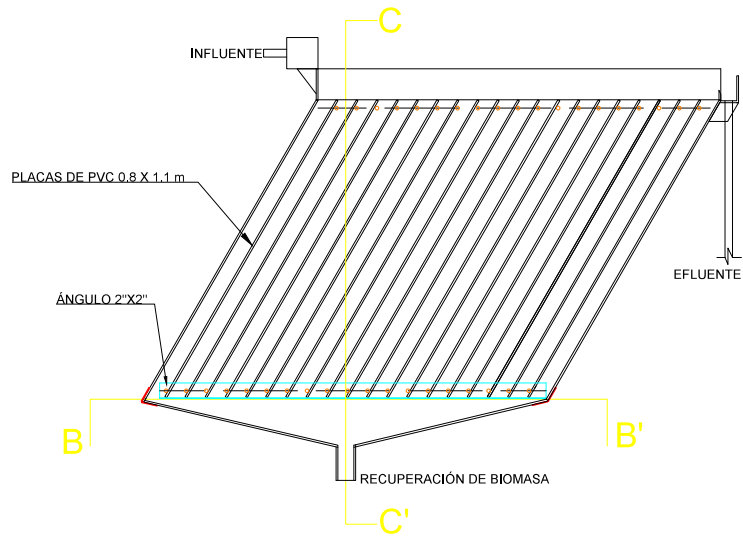
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

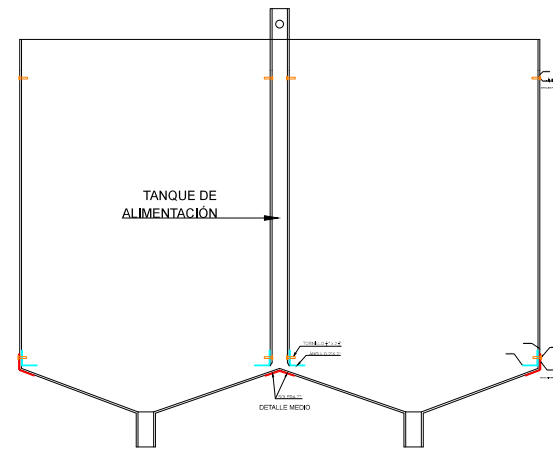
PLANTA DE CIENCIAS POLÍTICAS

JEFE DEL PROYECTO

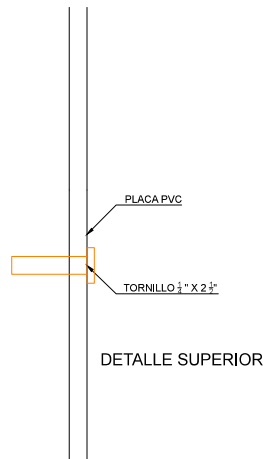
NOMBRE DEL PROYECTO



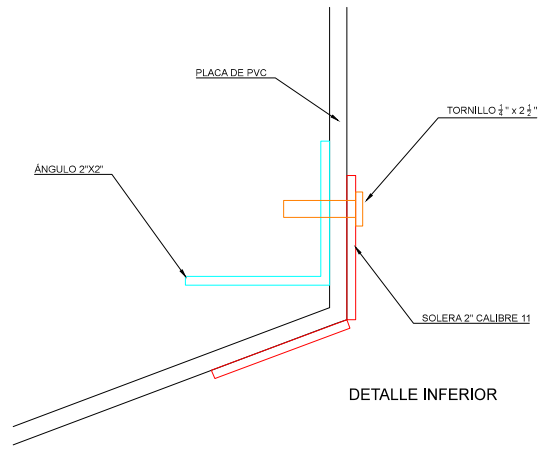
VISTA LATERAL CORTE A-A'



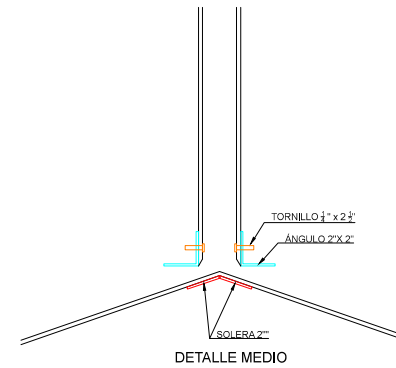
CORTE INTERNO C-C'



DETALLE SUPERIOR



DETALLE INFERIOR



DETALLE MEDIO



INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

PLANTA DE CIENCIAS POLÍTICAS

JEFE DEL PROYECTO

NOMBRE DEL PROYECTO

7.4.1 PRESUPUESTO DE OBRA

Con base a los planos elaborados y al precio de los materiales elegidos, se presenta en la Tabla 13 el presupuesto de la construcción del sedimentador

Tabla 13. Presupuesto de obra del sedimentador de alta tasa

CÓDIGO	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
PE	Paredes externas				
	Láminas de PVC blanco de 1.2 x 2.4 [m] y 6 [mm] de espesor	[m2]	6.882	\$ 778.25	\$ 5,356.25
	Láminas de Acrílico transparente de 1.2 x 2.4 [m] y 6 [mm] de espesor	[m2]	2.8	\$ 268.80	\$ 752.63
	Total Paredes externas				\$ 6,108.88
TOL	Tolva del sedimentador				
	Láminas de PVC blanco de 1.2 x 2.4 [m] y 6 [mm] de espesor	[m2]	1.107	\$ 778.25	\$ 861.86
	Láminas de Acrílico transparente de 1.2 x 2.4 [m] y 6 [mm] de espesor	[m2]	1.087	\$ 268.80	\$ 292.30
	Total Tolva				\$ 1,154.15
MIP	Módulo interno de placas				
	Láminas de PVC blanco de 1.2 x 2.4 [m] y 6 [mm] de espesor	[m2]	17.600	\$ 778.25	\$13,697.26
	Ángulo de acero inoxidable de 2x2" calibre 11	[m]	5	\$ 26.70	\$ 133.50
	Tornillos de acero inoxidable de 1/4" x 2 1/2"	[PZA]	152	\$ 2.94	\$ 446.88
	Rondana plana con neopreno	[PZA]	152	\$ 0.66	\$ 100.32
	Total Módulo Interno de Placas				\$14,377.96
ER	Estructura de refuerzo				
	Solera de acero inoxidable de 2" calibre 11	[m]	19.24	\$ 25.35	\$ 487.73
	Tornillos de acero inoxidable de 1/4" x 2 1/2"	[PZA]	50	\$ 1.12	\$ 56.00
	Rondana plana con neopreno	[PZA]	50	\$ 0.66	\$ 33.00
	Total Módulo Interno de Placas				\$ 576.73
	SUBTOTAL				\$22,217.73
	I.V.A 16%				\$ 3,554.84
	TOTAL				\$25,772.56

8. CONCLUSIONES

Se acepta la hipótesis de estudio, y se concluye que los cultivos del consorcio microalgal (*Scenedesmus obliquus*, especie dominante) con mayores tiempos de retención hidráulica, presentaron las mayores velocidades de sedimentación. La biomasa microalgal será susceptible de ser cosechada en un sedimentador de alta tasa para su posterior aprovechamiento en la producción de biocombustibles.

Se llevó a cabo el cultivo del consorcio de microalgas en agua residual doméstica y en reactor por lote de alta tasa, obteniendo una concentración microalgal promedio de 492 y 590 [mgSST/L], con tiempos de retención hidráulico de 8 y 15 días, respectivamente.

Se concluye que los cultivos de microalgas con mayor TRH (15 [días]) presentaron la mayor velocidad de sedimentación (1.89 [m/d]) y la mayor concentración microalgal (0.63 [gSST/L]), por lo que dichos resultados fueron seleccionados para el diseño de sedimentador de alta tasa.

Con base en los resultados experimentales de velocidad de sedimentación, el caudal y los criterios reportados en la literatura, fue posible realizar el diseño de un sedimentador de alta tasa de placas inclinadas de 1.3 [m] de altura, el cual tendrá un área superficial de 2.96 [m²] y un tiempo de retención de 13.97 [horas]. Al comparar la velocidad crítica obtenida del diseño, con la velocidad de sedimentación experimental, $v_s \geq v_{sc}$, se observa que teóricamente la remoción de la biomasa microalgal será efectiva.

A partir del diseño, se establecieron las bases constructivas para el sedimentador. Al analizar algunas opciones de materiales, se optó por láminas de PVC blanco de 6 [mm] de espesor para las placas inclinadas, mientras que las paredes del reactor serán en su mayoría de PVC y parte de acrílico, ambos de 6 [mm] de espesor. Como se observa en los cortes transversales de los planos, se consideró el uso de una estructura metálica (solera y ángulo de acero inoxidable de 2") para reforzar las uniones de las láminas. El costo del sedimentador es del orden de \$26,000.

REFERENCIAS

- Álvarez, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, (359), 63–89.
- AMDEE. (2015). Transición Energética : elemento clave frente al cambio climático.
- Arias Peñaranda, M. T., Martínez Roldán, A. de J., & Cañizares Villanueva, R. O. (2013). Producción de Biodiesel a partir de microalgas: Parámetros del cultivo que afectan la producción de lípidos.
- Arredondo, B. O., & Vázquez, R. (1991). Aplicaciones biotecnológicas en el cultivo de microalgas, (May 1991).
- AST ingeniería S. L. (2013). Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 69. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simões, M., & Pires, J. C. M. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1489–1500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.12.002>
- Collet, P., Hélias Arnaud, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R. A., & Steyer, J. P. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 102(1), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.154>
- CONAGUA. (2013). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Operación y mantenimiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario., 82.
- Demirbas, M. F. (2011). Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy*, 88(10), 3473–3480. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.059>
- Flotats, X., & Bonmati, A. (2011). Manure Processing Activities in Europe, (Ii), 1–8.

- Garibay-Hernández, a. (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3), 38–61. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Biodiesel+a+Partir+de+Microalgas#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Biodiesel+a+partir+de+microalgas#0>
- Gerardo, M. L., Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Coward, T., & Skill, S. C. (2015). Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: A review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research*, 11, 248–262. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.019>
- Gómez, L. M. (2007). Redalyc.MICROALGAS: ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS, 19(2).
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina Y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Huntley, M. E., & Redalje, D. G. (2007). *CO2 mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: A new appraisal. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (Vol. 12). <https://doi.org/10.1007/s11027-006-7304-1>
- Jiménez, B.; Buitrón, G. (1999). Sedimentadores de alta tasa para efluentes secundarios de tipo biológico.pdf.
- Loera-quezada, M. M., Olguín, E. J., Manejo, R. De, Recursos, B. De, Ecología, I. De, & Carretera, a C. I. K. (2010). Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Y Algal*, 1, 91–116. <https://doi.org/00000-355>
- Maldonado, V. (2010). Sedimentacion, 62.
- Manual, Q. A. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Part 4000 INORGANIC NONMETALLIC CONSTITUENTS Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., & Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*, 34(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.014>
- Metcalf, E., & Eddy, H. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. *Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 4th Edition. New Delhi, India.* [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)

- Mishra, A., Kavita, K., & Jha, B. (2011). Characterization of extracellular polymeric substances produced by micro-algae *Dunaliella salina*. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 852–857. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.067>
- Molina Grima, E., Belarbi, E. H., Acién Fernández, F. G., Robles Medina, A., & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20(7–8), 491–515. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2)
- O'Brien, K. R., Waite, A. M., Alexander, B. L., Perry, K. A., & Neumann, L. E. (2006). Particle tracking in a salinity gradient: A method for measuring sinking rate of individual phytoplankton in the laboratory. *Limnology and Oceanography: Methods*, 4(9), 329–335. <https://doi.org/10.4319/lom.2006.4.329>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. *Revista*, 1, 34.
- Peperzak, L., Colijn, F., Koeman, R., Gieskes, W. W. C., & Joordens, J. C. A. (2003). Phytoplankton sinking rates in the rhine region of freshwater influence. *Journal of Plankton Research*, 25(4), 365–383. <https://doi.org/10.1093/plankt/25.4.365>
- Peralta Ruiz, Y. Y., Pardo Cárdenas, Y., Canchila Romero, H. D., & Kafarov, V. (2012). Implementation of the process synthesis and analysis methodology to microalgae harvesting stage for biodiesel production. *Prospectiva*, 10(1), 132–144. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4212504&info=resumen&idioma=EN>
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Rodríguez, V. (2017). *Tratamiento de agua residual y lixiviado mediante el cultivo de microalgas en un reactor de alta tasa.pdf*.
- Romero, A. (1999). Romero Rojas Jairo Alberto - Potabilización Del Agua.pdf.
- Rosado, D. E. P., Córdoba, P. Z., Vilaboa, J., & Martínez, R. (2016). Adaptación y mitigación del cambio climático con la producción de bioenergéticos en suelos marginales * Adaptation and mitigation of climate change with bioenergy production on marginal soils Resumen Introducción, 2857–2866.
- SAGARPA. (2012). Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico, 1–26. Retrieved from www.gobiernofederal.gob.mx%5Cwww.sagarpa.gob.mx

- SAGARPA. (2013). Futuro de la Producción de Biocombustibles en México. Retrieved from [http://www.colpos.mx/wb_pdf/Notas/9 Presentacion Evento Colpos Chapingo 291113.pdf](http://www.colpos.mx/wb_pdf/Notas/9_Presentacion_Evento_Colpos_Chapingo_291113.pdf)
- Sanderson, K. (2014). Biocombustibles de segunda generación, *4*, 1–8.
- SENER. (2015). Prospectiva de Energías Renovables. *Diario Oficial de La Federación*, *1*, 156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Talmadge, W. P. & Fitch, E. B. *Determining thickener unit areas*. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 47, pp 38-41, 1955.
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., & Hoadley, A. (2010). Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *2*(1). <https://doi.org/10.1063/1.3294480>
- Vyas, A. P., Verma, J. L., & Subrahmanyam, N. (2010). A review on FAME production processes. *Fuel*, *89*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.014>
- Waite, A. M., & Nodder, S. D. (2001). The effect of in situ iron addition on the sinking rates and export flux of Southern Ocean diatoms. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *48*(11–12), 2635–2654. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00012-1)
- Xiao, R., & Zheng, Y. (2016). Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. *Biotechnology Advances*, *34*(7), 1225–1244. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.08.004>
- Yao, K. M. (1970). Theoretical Study of High- Rate Sedimentation, *42*(2), 218–228.
- Zamarripa, A. (2011). Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en México, 0–54.

ANEXO A

A1. CURVAS DE CRECIMIENTO MICROALGAL Y REMOCIÓN DE NUTRIENTES

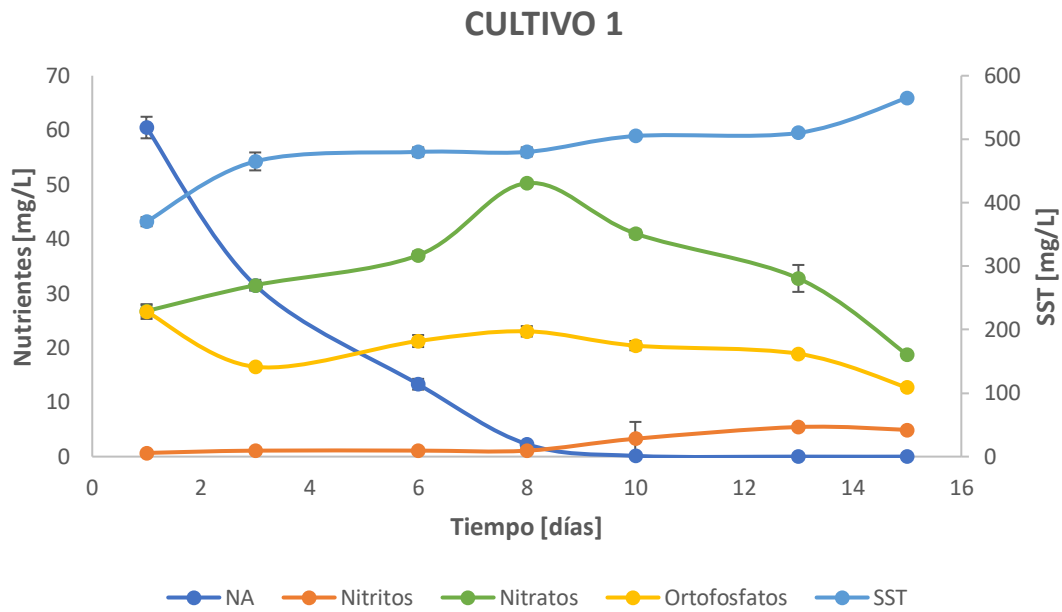


Figura 16. Curva de crecimiento microalgal y remoción de nutrientes para el cultivo 1

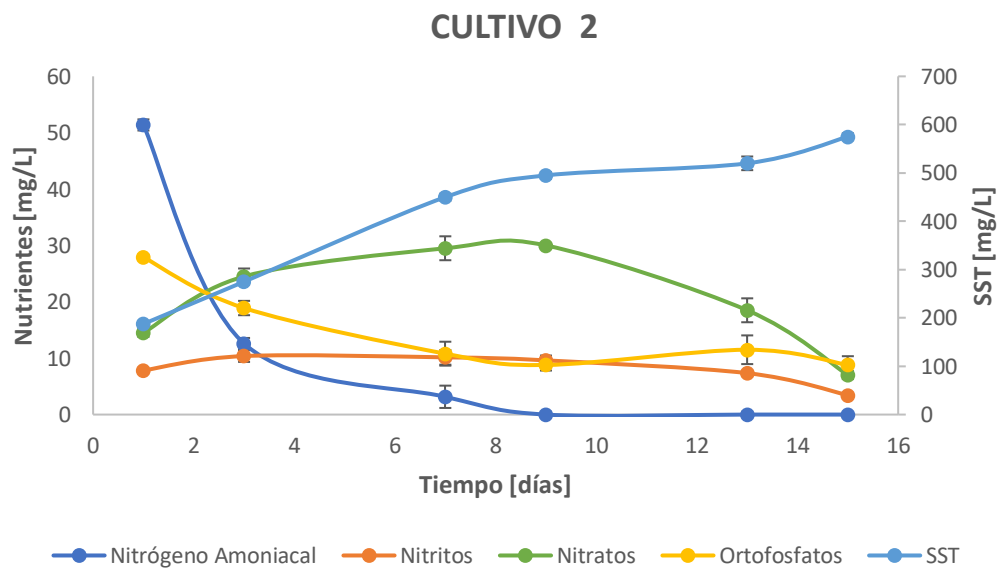


Figura 17. Curva de crecimiento microalgal y remoción de nutrientes para el cultivo 2

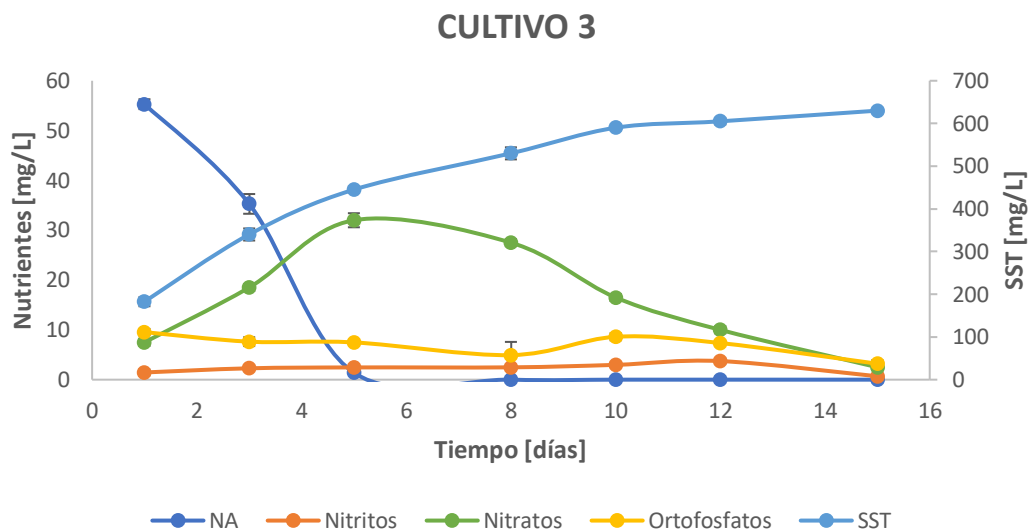


Figura 18. Curva de crecimiento microalgal y remoción de nutrientes para el cultivo 3

Tabla 14. Tabla de concentraciones obtenidas de biomasa microalgal

Cultivo	Concentración					
	Inicial		8 días de TRH		15 días de TRH	
1	370	±7.07	480	±14.14	565	±7.07
2	187.5	±3.536	465	±7.071	575	±7.071
3	182.5	±10.61	530	±14.14	630	±0.000

Tabla 15. Remociones registradas de Nitrógeno Amoniacal

Cultivo	Nitrógeno Amoniacal					
	Inicial [mg/L]		Final [mg/L]		Remoción [mg/L]	Remoción [%]
1	60.48	±1.98	0	±0.00	60.48	100
2	55.3	±1.99	0	±0.00	55.3	100
3	51.38	±1.100	0	±0.00	51.38	100

Tabla 16. Remociones registradas de Nitritos

Cultivo	Nitritos					
	Inicial [mg/L]		Final [mg/L]		Remoción [mg/L]	Remoción [%]
1	0.673	±0.160	4.91	±0.127	-	-
2	1.44	±0.566	0.68	±0.067	0.76	52.78
3	7.83	±0.099	3.44	±0.085	4.39	56.07

Tabla 17. Remociones registradas de Nitratos

Cultivo	Nitratos					
	Inicial [mg/L]		Final [mg/L]		Remoción [mg/L]	Remoción [%]
1	26.75	±1.061	18.75	±0.354	8	29.91
2	7.5	±0.707	2.5	±1.414	5	66.67
3	14.5	±0.707	7	±1.414	7.5	51.72

Tabla 18. Remociones registradas de Ortofosfatos

Cultivo	Ortofosfatos					
	Inicial [mg/L]		Final [mg/L]		Remoción [mg/L]	Remoción [%]
1	26.66	±1.358	12.7	±0.566	13.96	52.36
2	9.55	±0.636	3.2	±0.071	6.35	66.49
3	27.9	±3.536	8.8	±7.071	19.1	68.46

A2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL CONSORCIO MICROALGAL.

El procedimiento empleado para obtener la velocidad crítica de la curva de sedimentación del consorcio microalgal se describe a continuación y se ejemplificará con los datos obtenidos para la probeta número 1 del Cultivo 1 con TRH de 15 días.

1. Primero se deberán tabular los valores de alturas y tiempo que se obtuvieron en los ensayos de sedimentación, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de Altura-Tiempo registrados

Tiempo [min]	Cultivo 1	
	Probeta 1	Probeta 2
	Altura [cm]	
5	34.8	34.8
10	33.8	33.6
15	32.4	32.0
20	31.2	30.8
25	30.1	29.6
30	28.9	28.4
35	27.8	26.8
40	26.7	25.7
45	25.8	24.5
50	24.8	23.8
55	24.0	22.9
60	23.1	22.1
65	22.2	21.0
70	21.4	20.3
75	20.5	19.6
90	19.3	18.7
120	18.2	17.5
150	17.5	16.9
180	17.2	16.4

2. El siguiente paso consiste en graficar la pareja de valores (tiempo-altura) para obtener la curva de sedimentación.

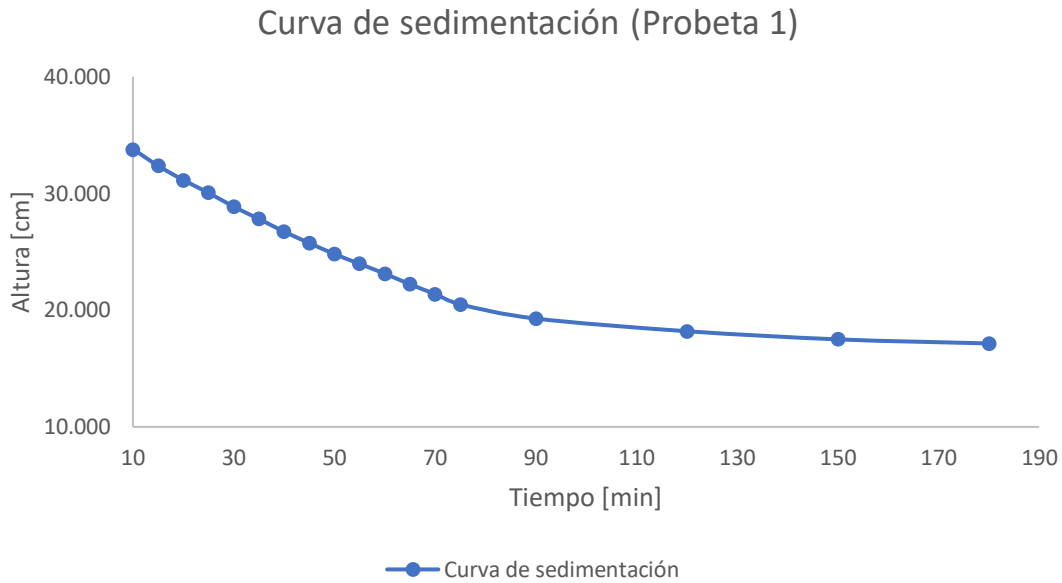


Figura 19. Gráfica de curva de sedimentación para los valores de Altura- Tiempo registrados

3. Posteriormente se deberá agregar la línea de tendencia a la curva buscando que el ajuste lineal (R^2) sea lo más cercano a 1. Para el ejemplo, la ecuación resultante fue la siguiente: $y = 0.0009x^2 - 0.2716x + 36.135$, con un ajuste lineal R^2 de 0.99467.

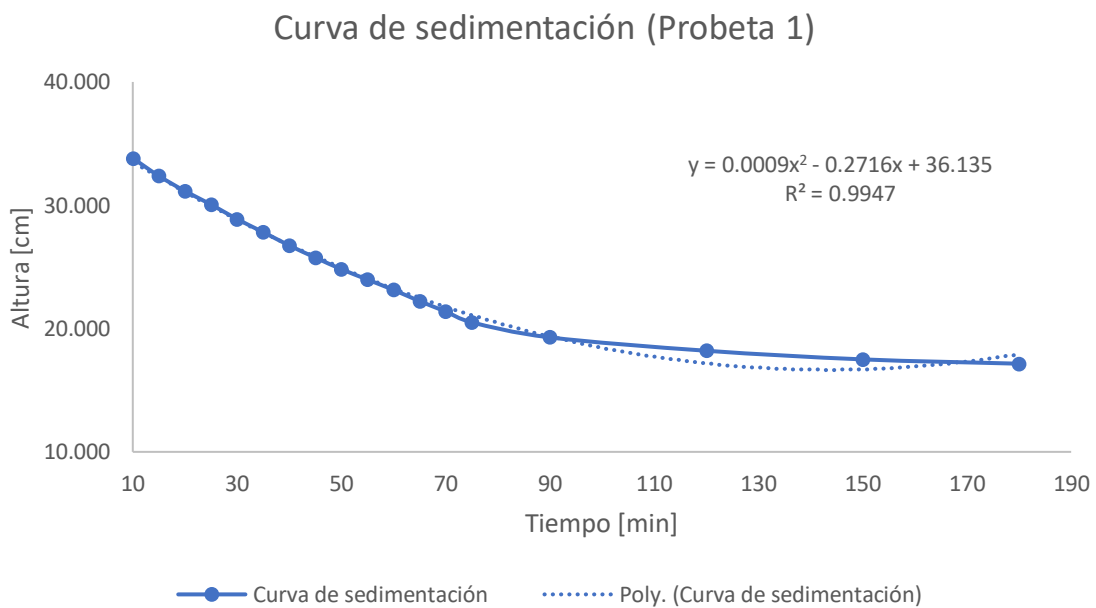


Figura 20. Trazo de la línea de tendencia para la curva de sedimentación

4. El siguiente paso consiste en **obtener la ecuación de la recta tangente en la primera parte de la curva de sedimentación**, correspondiente a la zona de sedimentación discreta. Se sabe que la ecuación de la recta tangente en el punto P se expresa de la siguiente forma:

$$y - y(x_0) = m(x - x_0)$$

Donde m es la pendiente y las coordenadas del punto de interés son P $(x_0, y(x_0))$.

La derivada de la función $y(x)$ en el punto P es igual a la pendiente de la recta tangente en ese punto.

$$m = y'(x)$$

Al sustituir la pendiente (m) por el valor de la primera derivada en ese punto y despejando la variable dependiente se obtiene:

$$y = y'(x)(x - x_0) + y(x_0)$$

Dada la función $y = 0.0009x^2 - 0.2716x + 36.135$ se procede a encontrar la recta tangente en el punto P (15, 32.375).

La derivada de la ecuación es $y' = 0.0018x - 0.2716$

Al sustituir la derivada y las coordenadas de P en la ecuación se obtiene que

$$y = -0.0018x - 0.2716(x - 15) + 32.375$$

Realizando las operaciones y simplificando los términos de la ecuación se llega a la siguiente ecuación de la recta:

$$**y = -0.2446x + 36.044**$$

Sabemos que, si y es una función lineal de x , entonces el coeficiente de x es la pendiente de la recta. Por lo tanto, la ecuación se expresa como $y = mx + b$, en donde m es el valor de la pendiente y para este trabajo la pendiente representa la velocidad en la zona de sedimentación discreta.

Para la ecuación $y = -0.2446x + 36.044$ el valor de la pendiente m es -0.2446 y corresponde a la velocidad en la zona de sedimentación discreta. Con esta ecuación se tabulará con distintos valores de x para representar en la gráfica de la curva de sedimentación.

Para obtener la **ecuación de la recta tangente para la zona de compresión** se puede hacer una simplificación considerando que la velocidad al final de la curva es cero, es decir, se tendrá una recta con pendiente cero. Para trazar esta tangente se utilizará el último punto registrado, es decir, al minuto 180 con la altura correspondiente. Sustituyendo en la ecuación de la recta tangente $m = 0$ y P (180, 17.15), se obtiene la siguiente ecuación:

$$y = 0(x - 180) + 17.15$$

$$y = 17.15$$

También se deberá tabular con distintos valores de x para representarla en la curva de sedimentación.

En la intersección de las tangentes obtenidas se trazará la bisectriz del ángulo y se prolongará hasta tocar la curva de sedimentación, este punto se conocerá como **C** el cual representa el momento crítico donde comienza la compactación.

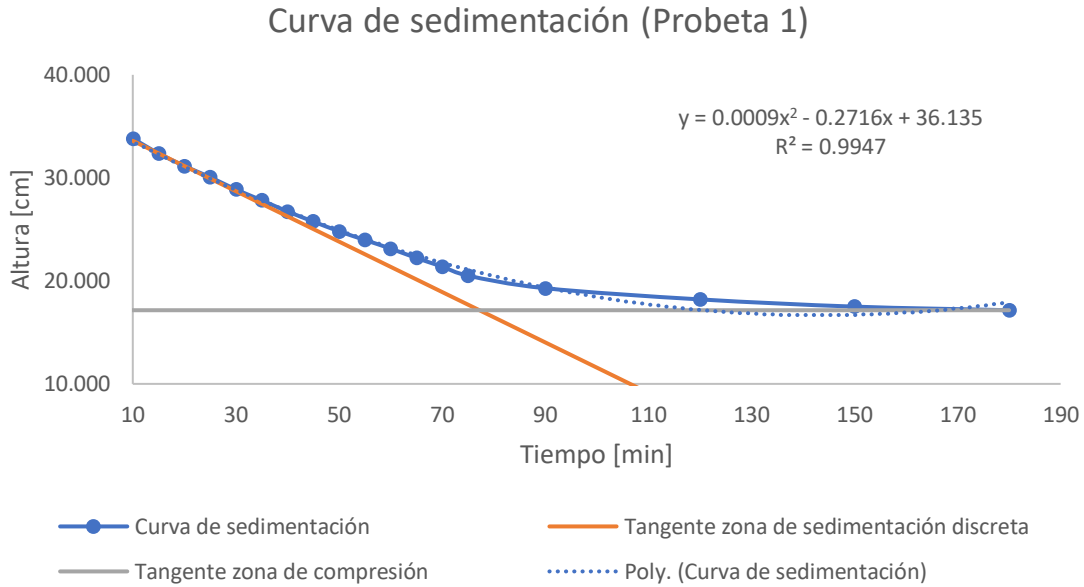


Figura 21. Trazo de tangentes en la zona de sedimentación discreta y zona de compresión

5. Para calcular el ángulo formado por las dos rectas se utilizará el concepto de vectores directores, dichos vectores dan la dirección y sentido a una recta. Por ejemplo: el vector director de la recta $y = ax + b$ será $\mathbf{u} (1, a)$.

Tabla 20. Vectores directores para las rectas trazadas

Ecuación	Vector director
$y = -0.2446x + 36.044$	$\mathbf{U} (1, -0.2446)$
$y = 17.15$	$\mathbf{V} (1, 0)$

Para calcular el ángulo será necesario utilizar la siguiente ecuación.

$$\alpha = \arccos \left[\frac{|u_1 v_1 + u_2 v_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación, se tiene:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{1(1 * 1) + (-0.2446 * 0)1}{\sqrt{-0.2446^2 + 1^2} \sqrt{0^2 + 1^2}} \right]$$

$$\alpha = 13.75^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - 13.75 = 166.25^\circ$$

6. Conociendo el ángulo se podrá trazar la bisectriz que pasará por el punto de unión de las dos tangentes hasta tocar a la curva de sedimentación en donde se encuentra el punto crítico. El punto crítico se localiza a un tiempo de 77 min y una altura h, de 20.3467 cm.

En el punto obtenido (77, 20.3467) se calcula la ecuación de la recta tangente, con lo que se obtiene $y = -0.133x + 30.5877$.

Se puede observar que el valor de la pendiente es 0.133 y corresponde a la velocidad en el punto crítico. En la Tabla 21 se muestran las velocidades obtenidas con el análisis gráfico. En la Figura 22 se muestra gráficamente los resultados obtenidos.

Tabla 21. Velocidades obtenidas para cada tramo de la curva de sedimentación

Probeta 1, Cultivo 1	
Sección de la curva	Velocidad obtenida [m/día]
Zona de sedimentación discreta	$v = 3.522$
Punto crítico	$v = 1.915$
Zona de compresión	$v = 0$

Curva de sedimentación (Probeta 1)

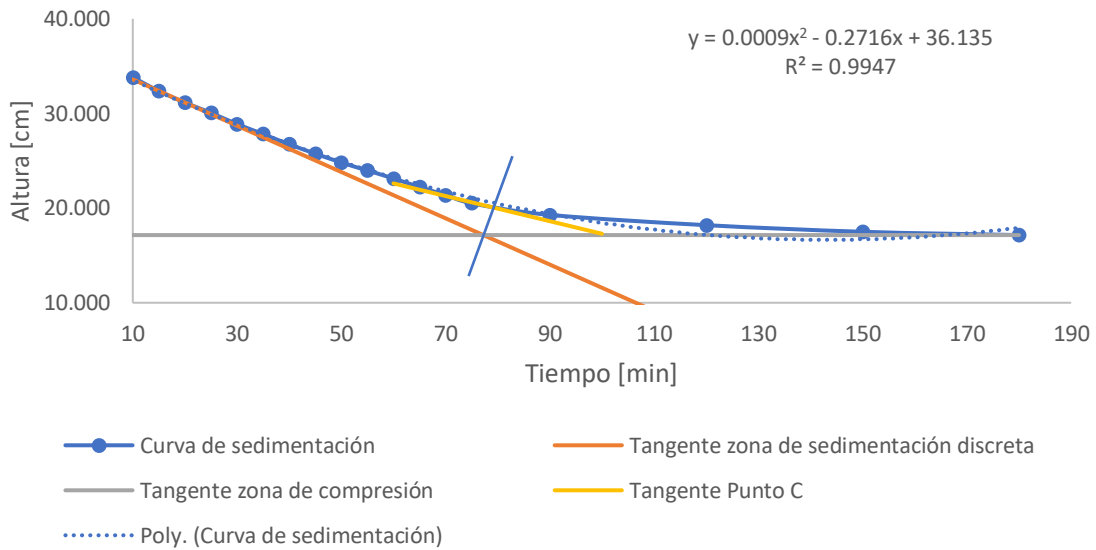


Figura 22. Localización del punto crítico en la curva de sedimentación

Se sigue el mismo procedimiento para el cálculo de la velocidad en el punto crítico de cada probeta.

Tabla 22. Valores registrados de Altura-Tiempo para los cultivos 1, 2 y 3 con 8 días, con concentraciones de biomasa microalgal de 480, 530, 465 [mg/L] respectivamente

Tiempo [min]	Cultivo 1		Cultivo 2		Cultivo 3	
	Altura [cm]					
5	34.77	±0.03	34.83	±0.00	34.81	±0.03
10	34.50	±0.02	34.32	±0.03	34.48	±0.00
15	34.24	±0.05	33.97	±0.03	34.24	±0.05
20	33.99	±0.05	33.78	±0.00	33.96	±0.05
25	33.73	±0.02	33.59	±0.02	33.74	±0.10
30	33.48	±0.07	33.36	±0.05	33.47	±0.05
35	33.29	±0.05	33.15	±0.10	33.24	±0.02
40	33.08	±0.00	32.97	±0.10	33.06	±0.03
45	32.85	±0.07	32.80	±0.10	32.82	±0.08
50	32.64	±0.03	32.59	±0.05	32.61	±0.08
55	32.43	±0.03	32.38	±0.00	32.40	±0.08
60	32.20	±0.00	32.19	±0.02	32.19	±0.02
65	32.05	±0.02	32.03	±0.00	32.03	±0.00
70	31.87	±0.03	31.85	±0.00	31.87	±0.03
75	31.66	±0.03	31.70	±0.02	31.66	±0.03
90	31.03	±0.13	31.30	±0.05	31.03	±0.13
120	29.53	±0.22	30.77	±0.05	29.53	±0.22
180	27.08	±0.42	29.79	±0.15	27.69	±0.40

Tabla 23. Valores registrados de Altura-Tiempo para los cultivos 1, 2 y 3 con 15 días de TRH, con concentraciones de biomasa microalgal de 565, 630, 575 [mg/L] respectivamente

Tiempo [min]	Cultivo 1		Cultivo 2		Cultivo 3	
	Altura [cm]					
5	34.80	±0.05	34.67	±0.03	34.83	±0.00
10	33.69	±0.13	33.52	±0.12	33.60	±0.00
15	32.21	±0.25	31.47	±0.05	32.12	±0.12
20	31.00	±0.22	30.11	±0.05	30.91	±0.10
25	29.83	±0.35	28.69	±0.02	29.76	±0.25
30	28.62	±0.37	27.25	±0.03	28.62	±0.37
35	27.31	±0.74	25.89	±0.02	27.22	±0.62
40	26.24	±0.71	24.52	±0.03	26.19	±0.64
45	25.15	±0.86	23.61	±0.03	25.05	±0.71
50	24.31	±0.72	22.69	±0.05	23.96	±0.23
55	23.46	±0.74	21.71	±0.05	23.02	±0.12
60	22.62	±0.74	21.02	±0.03	21.99	±0.15
65	21.64	±0.84	20.29	±0.02	21.08	±0.15
70	20.85	±0.77	19.57	±0.05	19.95	±0.00
75	20.06	±0.64	18.87	±0.05	19.06	±0.03
90	19.01	±0.40	17.12	±0.05	18.10	±0.15
120	17.84	±0.52	14.30	±0.07	16.28	±0.20
180	17.19	±0.45	13.27	±0.05	15.23	±0.25