



IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE VALORIZACIÓN EN UNA BIORREFINERÍA DE SARGAZO MEDIANTE SIMULACIÓN

Idónea Comunicación de Resultados de la Especialización en Ciencias
Naturales e Ingeniería



Presentado por: I.B. Omar Flores Mendoza

Directora del Proyecto: Dra. María Teresa López Arenas,
Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma
Metropolitana – Cuajimalpa

Mayo 2025

POSGRADO EN CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - CUAJIMALPA





Esta idónea comunicación de resultados fue realizada dentro del Programa de Especialización del **Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería** de la División de Ciencias Naturales e Ingeniería (DCNI) de la Universidad Autónoma Metropolitana- Unidad Cuajimalpa. El trabajo Implementación de tecnologías de valorización en una biorrefinería de sargazo mediante simulación (teórico) fue realizado de Febrero-2024 a Junio-2025 en los laboratorios del DPT de la DCNI

DECLARACIÓN DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F. el día 24 del mes Junio del año 2025, el que suscribe Omar Flores Mendoza alumno del Programa de Especialización en Ciencias Naturales e Ingeniería de la División de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Cuajimalpa, manifiesta que es autor intelectual de la presente idónea comunicación de resultados intitulada; "Implementación de tecnologías de valorización en una biorrefinería de sargazo mediante simulación"

realizada bajo la dirección de la Dra. María Teresa López Arenas y cede los derechos de este trabajo a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráfico o de datos del trabajo, sin el permiso expreso de la directora del trabajo como representante de la UAM. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: mtlopez@cua.uam.mx

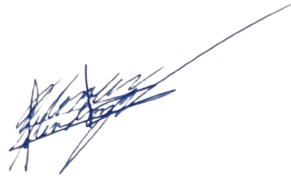
Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Omar Flores Mendoza

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

“El que suscribe, Omar Flores Mendoza, alumno del Programa de Especialización en Ciencias Naturales e Ingeniería declara que los resultados reportados en esta idónea comunicación de resultados, son producto de mi trabajo con el apoyo permitido de terceros en cuanto a su concepción y análisis. Así mismo, declaro que hasta donde es de mi conocimiento no contiene material previamente publicado o escrito por otras (s) persona (s) excepto donde se reconoce como tal a través de citas y que este fue usado con propósitos exclusivos de ilustración o comparación. En este sentido, afirmo que cualquier información sin citar a un tercero es de mi propia autoría. Declaro, finalmente, que la redacción de este trabajo es producto de mi propia labor con la dirección y apoyo de mi director y de mi comité tutorial, en cuanto a la concepción del proyecto, al estilo de la presentación y a la expresión escrita.”



Omar Flores Mendoza

DECLARACIÓN DE NO LUCRO:

El que suscribe, Omar Flores Mendoza alumno del Programa de Especialización en Ciencias Naturales e Ingeniería, manifiesta su compromiso de no utilizar con fines de difusión, publicación, protección legal por cualquier medio, licenciamiento, venta, cesión de derechos parcial o total o de proporcionar ventajas comerciales o lucrativas a terceros, con respecto a los materiales, datos analíticos o información de toda índole, relacionada con las actividades e intercambios de información derivados de la relación de investigación académica y tecnológica desarrollada entre la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y Omar Flores Mendoza.



Omar Flores Mendoza

Contenido

Contenido.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Biorrefinerías	3
1.2 La problemática del sargazo	4
1.3 Biomasa lignocelulósica	6
1.5 Compuestos inhibitorios	8
1.6 Justificación	9
1.7 Objetivos.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Recolección del sargazo	11
2.2 Componentes del sargazo	12
2.3 Posible productos con valor agregado	13
2.4 Componentes inhibitorios en la fermentación	16
3. METODOLOGIA.....	19
3.1 Caracterización del sargazo	20
3.2 Diseño conceptual de la biorrefinería.....	20
3.3 Diseño básico: Tecnologías de valorización del sargazo.....	23
Caso I: Producción de Alginato	23
Caso II: Producción de Alginato, PHB y Biofertilizante.....	24
Caso III: Producción de Alginato, Ácido láctico y Biofertilizante.....	26
Caso IV: Producción de bioenergía	27
3.4 Metodología de modelado y Simulación.....	17
3.5 Evaluación de la biorrefinería.....	28
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN	30
4.1 Cantidad y composición del sargazo	30
4.2 Efecto de los compuestos inhibitorios	32
4.3 Análisis Técnico-Económico-Ambiental de los casos de estudio	33
5. ANÁLISIS DE IMPACTO SOCIAL	41

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	44
REFERENCIAS	45
Anexo A. REPORTE ECONOMICO DETALLADO	52
Anexo B. ENCUESTA REALIZADA EN LA INVESTIGACIÓN DE CAMPO.....	56
Anexo C. PRODUCTOS CIENTÍFICOS GENERADOS	68

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Biorrefinerías

A partir del siglo XIX los cambios mediados por la revolución industrial permitieron que la producción a gran escala de bienes se intensificara al igual que el uso indiscriminado recursos naturales, provocando un incremento en la cantidad de basura producida y un alza en la quema de combustibles fósiles (Kiss, 2024). Un factor a destacar dentro de la cantidad de productos, y por ende de desechos, generados es el sistema capitalista en el que vivimos, puesto que emplea un modelo económico lineal, en el cual la materia prima es extraída de los recursos naturales para ser refinada y posteriormente fabricar los artículos que serán puestos a la venta en las tiendas para al final de su vida útil ser desechados en basureros, tiraderos, bosques o cuerpos de agua. La Organización de las Naciones Unidas (United Nations, 2024) define el cambio climático como “cambios a largo plazo de las temperaturas y patrones meteorológicos”, del mismo modo establece que a partir del siglo XIX la emisión de gases de efecto invernadero, derivados de la quema de combustibles fósiles, han sido la causa principal del calentamiento global.

Una de las formas de reducir los gases de efecto invernadero en el área de producción industrial es al utilizar tecnologías más limpias y optar por enfoques distintos a los que el capitalismo nos dicta. Distintos paradigmas como el desarrollo sostenible, la bioeconomía y la economía circular plantean el poder satisfacer las necesidades actuales sin poner en riesgo la capacidad de las futuras generaciones, al emplear los residuos de distintos sectores como el agrario, el forestal, la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), entre otros. Los modelos que tienen como finalidad la integración de procesos y tecnologías que permitan la refinación de materia orgánica en distintos productos con un mayor valor agregado son denominados biorrefinerías y pueden clasificarse dependiendo de: los productos generados, su avance tecnológico o su tamaño (Trigo et al., 2011). Estas plantas de procesamiento se dividen en generaciones en función del avance tecnológico que se tenga, y se clasifican en (Gupta y Mondal, 2020):

- Primera generación: al ser cultivos agrícolas compiten por el insumo puesto que comúnmente se destinan a la alimentación de la sociedad. La caña de azúcar o los granos del maíz son un claro ejemplo de la materia usada empleada y el proceso de conversión consta de la biotransformación de los hidratos de carbono presentes en productos de algún tipo de fermentación empleando distintos microorganismos.
- Segunda generación: el principal recurso que se utiliza suele ser materia vegetal proveniente de cultivos leñosos o agrícolas que ya cumplieron su función alimenticia, lo que implica un aumento en la sostenibilidad en contraste con otras tecnologías, no obstante, la lignina presente se traduce como un reto para el aprovechamiento de la fuente de carbono (celulosa).

- Tercera generación: son instalaciones donde se procura una fuente materia vegetal no consumible y de rápido crecimiento, por esta razón los organismos empleados suelen ser algas.
- Cuarta generación: similar a la anterior generación, las algas son las empleadas en la elaboración de los distintos bioproductos, sin embargo, la implementación de tecnologías relacionadas a la ingeniería genética para hacer la conversión de sustrato-producto más eficiente y es lo que resalta en esta generación.

1.2 La problemática del sargazo

El sargazo es una macroalga parda (*Phaeophyceae*) del género *Sargassum*, que crece en mantos de aguas tropicales y subtropicales, y puede crecer anclado a superficies rocosas o flotando en medio del mar formando colonias que abarquen grandes extensiones, esto último es gracias a que poseen vesículas llenas de gas (Herrera-Monroy, 2015). De las distintas especies de sargazo existentes, se ha identificado que dos de ellas llegan en mayor medida a las costas del caribe mexicano (CCM) y son: *Sargassum natans* (*S. natans*) y *Sargassum fluitans* (*S. fluitans*).

A partir de la segunda mitad de la década pasada los arribazones de sargazo empezaron a ser más frecuentes y en mayor cantidad; provocando diversos problemas para los sectores de la pesca, turismo y el medioambiental, debido a que su presencia impide realizar la fotosíntesis a los pastos marinos y a que su degradación incrementa la concentración de gases de efecto invernadero que se liberan en la atmósfera (CONACYT, 2019). Las especies de sargazo que llegan a las CCM se generan principalmente en dos zonas de Océano Atlántico:

1. El denominado mar de los sargazos que crece frente a las costas del sureste de Estados Unidos, se encuentra delimitado por distintas corrientes oceánicas que impiden su propagación y se tiene registro desde la época de la expansión de la corona española al continente americano con los viajes realizados por Cristóbal Colón.
2. El llamado “Nuevo mar de los sargazos” o “Cinturón de los sargazos” (ver Figura 1). La formación de esta segunda zona (según la organización *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory*, 2024) se relaciona con el patrón climático conocido como “Oscilación del Atlántico Norte”, puesto que permitió la propagación del alga a zonas cercanas a Europa, y que posteriormente encontrarían una zona ilimitada para su crecimiento con una gran cantidad de nutrientes entre los continentes Africano y el sur de América a partir del año 2010, y se extiende por 8,850 kilómetros por el Atlántico por la costa oeste de África hasta el Golfo de México.

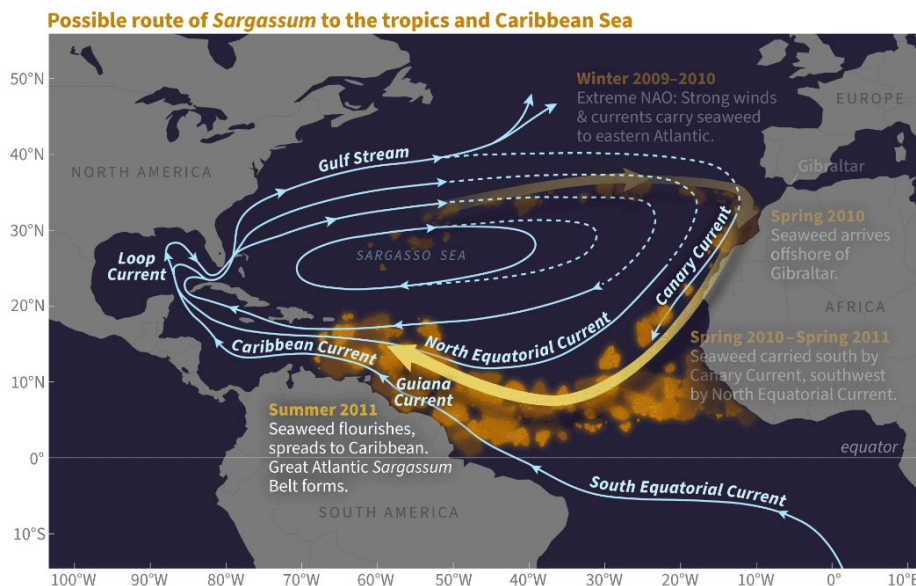


Figura 1.- Representación geográfica de la formación del cinturón de los sargazos (obtenida del Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico, 2023).

El estado de Quintana Roo es uno de los treinta y un estados que junto con la Ciudad de México conforman a los Estados Unidos Mexicanos, éste se encuentra ubicado en la península de Yucatán, en la región sureste del país y se encuentra delimitado por el Golfo de México y el Mar Caribe. Quintana Roo alberga distintos centros económicos como Cancún, Playa del Carmen, Tulum, Cozumel e Isla Mujeres, los cuales según la INEGI (2020) atrajeron a más de 15 millones de turistas en el 2019 y generó a su vez más de 16 mil millones de dólares de ingreso; posicionando al turismo como la actividad económica más importante del estado. Tulum es una de las entidades que más dependen del turismo en el estado, según Miguel Améndola reportero de La Jornada (Améndola, 2019; 2022) menciona que se cuentan con 10 mil 985 habitaciones en las cuales se tiene una ocupación anual del 81%. El turismo es el motor económico local debido a que genera miles de empleos en los sectores de hotelería, transporte, actividades recreativas, restaurantes, al igual que recibe grandes inversiones para la construcción de hoteles, boutiques, resorts ecológicos e inclusive en la venta de bienes raíces para personas que buscan establecerse en la zona. Con la llegada del sargazo y los problemas medioambientales que trajo consigo, también acarreo ciertas dificultades para el sector más importante de Tulum, puesto que las playas de la Riviera Maya siempre se han caracterizado por su arena blanca, sus aguas transparentes y turquesas, pero con la acumulación del alga en las playas, estas han cambiado sus destacados colores por unos de tonos marrones, desprendiendo olores desagradables, pudiendo también llegar a causar malestares físicos como dolor de cabeza, náuseas e irritación.

La Secretaría de Marina-Armada de México ha llevado a cabo la Estrategia Nacional para combatir los arribazones de sargazo en las CCM desde mayo del año 2019 con el

propósito de recolectar el sargazo en aguas someras y depositarlo en rellenos sanitarios. No obstante, Miranda (2022) reportó que para ese año se recolectaron aproximadamente 18 mil toneladas del alga en todo el estado de Quintana Roo, pero al no contar con los suficientes rellenos sanitarios, gran parte del material recolectado terminó en tiraderos clandestinos, predios abandonados, playas recónditas o en manglares.

Algunos de los posibles usos que se le pueden dar al sargazo es la producción de biocombustibles y la biorremediación, ya que para la primera se utiliza como materia prima en ciertos procesos, y en la segunda la presencia de sitios de unión creados por diferentes grupos funcionales como grupos hidroxilo, carboxilo, sulfhidrilo, sulfato y amino en la superficie de la pared celular permiten sitios de unión iónica, es decir, reacciones de intercambio iónico natural con grupos protonados desde la superficie (Barros Motta y Rodríguez Zorro, 2020), no obstante, no se tiene registro de su implementación por parte del gobierno mexicano. Otras alternativas que se le está dando al sargazo es en la fabricación de zapatos, ladrillos, libretas, fólderes, portavasos y fertilizantes.

1.3 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica se caracteriza por estar compuesta de tres polímeros distintos: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina; y estos se conforman a su vez por diferentes monómeros como la D-glucosa para la celulosa; la xilosa, manosa, galactosa y glucosa para la hemicelulosa; e hidroxifenilos, guayacilo y siringilo para el caso de la lignina (Maceda et al., 2021). En el caso de los monómeros de la celulosa se encuentran unidos entre ellos por enlaces glucosídicos β -1,4, y estos a su vez se asocian en subunidades denominadas microfibrillas llegando a tener un espesor de 25 nanómetros aproximadamente. Para el caso de la hemicelulosa, se compone por una cadena ramificada que se une en mayor medida por enlaces β -1,4-glucosídicos y en menor cantidad por enlaces β -1,2 β -1,3; β -1,6-glucosídicos; y a su vez funge como conector entre la lignina y las fibras de celulosa. La lignina es un heteropolímero que está constituido por compuestos aromáticos que se enlazan mediante puentes de hidrógeno, enlaces de Van der Waals y covalentes (Suárez-Matallana et al., 2022); y es lo que le da soporte estructural impermeabilidad, resistencia contra el ataque microbiano y el estrés oxidativo a las plantas.

La materia lignocelulósica se ha sometido a estudios constantes desde antes de entrar al siglo XXI debido a que es uno de los recursos más abundantes en el planeta, es un recurso renovable y a que en su crecimiento se fija el carbono de la atmósfera (lo que se denomina carbón neutral); para fungir de insumo y transformarla en distintos productos como biocombustibles, biopolímeros, enzimas y bioenergía. No obstante, en la mayoría de los casos es necesario extraer la celulosa del resto de los compuestos, por lo que la ruptura de los enlaces presentes entre los tres compuestos antes mencionados es de gran

importancia tanto para los aspectos económicos, como en los técnicos; debido a esto, se han planteado distintos métodos para lograr este objetivo a los cuales se les denominan pretratamientos.

El ***pretratamiento en los materiales lignocelulósicos*** hace referencia a la solubilización, separación y a la reducción en la cristalinidad de la celulosa, hemicelulosa y lignina con el fin de exponer la celulosa a una hidrólisis enzimática. Dado que existen diferencias en las distintas biomásas lignocelulósicas el encontrar un diseño general de un proceso de pretratamiento puede ser complicado, por esto, al elegir el mejor método a emplear en un caso en específico deben seguirse ciertos criterios como: evitar la degradación de los azúcares formados, limitar la formación de compuestos tóxicos o inhibitorios, minimizar la demanda energética, tener reacciones rápidas y utilizar reactivos de bajo costo (Galbe y Wallberg, 2019; Espinosa-Negrín et al., 2022). Los pretratamientos pueden clasificarse como sigue (Espinoza-Negrin et. al., 2021):

- Físicos: se busca aumentar el área expuesta para disminuir las zonas cristalinas de la celulosa al igual que mejorar la transferencia de materia, para ello se utilizan operaciones como la molienda, la trituración, la pirolisis entre otras.
- Químicos: dependiendo de los reactivos utilizada se clasifican en tratamientos ácidos, alcalinos, de oxidación húmeda, ozonólisis y líquidos iónicos, todos se fundamentan en reacciones químicas que atacan a los enlaces entre la lignina y la hemicelulosa. Una vez terminado el pretratamiento se tiene que eliminar los reactivos de la biomasa resultante, puesto que la presencia de estos puede inhibir ciertos procesos como el de la fermentación.
- Fisicoquímicos: estos métodos hacen uso de cambios de presión y temperatura para romper la estructura lignocelulósica, algunas de las técnicas englobadas son explosión de vapor, extracción con agua caliente (*LHW = Liquid Hot Water*), expansión de fibra de amonio (*AFEX = Ammonia Fiber Expansion*), percolación de reciclaje de amoníaco (*ARP = ammonia recycle percolation*) y fluido supercrítico (*SCF= super critical fluid*).
- Biológicos: en la naturaleza diversos hongos utilizan la materia lignocelulósica como fuente de sustrato al producir enzimas que digieran la biomasa y requieren de muy baja energía, sin embargo, es un proceso lento que toma semanas en completarse.

Entre los métodos más utilizados en la industria está la hidrólisis ácida debido a su alta eficiencia para romper la matriz lignocelulósica, sus bajos costos y fáciles de operar. Los pretratamientos ácidos pueden tener variaciones entre la concentración del ácido empleado y la temperatura de operación, por lo que se han creado dos subdivisiones: el de ácido concentrado y el de ácido diluido.

Con el método de pretratamiento ácido diluido se alcanza casi la totalidad de la hidrólisis de la hemicelulosa al igual que la solubilización de la lignina; las condiciones de operación suelen conllevar una concentración de entre 0.1 % y 5 % p/p, con temperaturas que rondan entre 120-215 °C, presiones entre 2-20 atmósferas, y tiempos de residencia entre 10-120 minutos (Wooley et al., 1999). Algunas de las ventajas de usar ácido diluido son: los bajos costos de los reactivos, un bajo índice de corrosión de los equipos, generación de menor cantidad de residuos que al emplear ácido concentrado y por lo tanto no se destina tanto presupuesto a su tratamiento. Las desventajas al utilizar este pretratamiento se asocian con el impacto medioambiental, a la disposición de residuos y a la generación de compuestos inhibitorios para la etapa de fermentación.

Mientras que con el pretratamiento ácido concentrado, como su nombre menciona, se emplean concentraciones de ácido elevadas (superiores al 25 % v/v), la temperatura no suele exceder los 100 °C y la presión tiende a rondar entre 1 y 2 atmósferas. Al emplear altas concentraciones del ácido, en un primer momento se solubiliza la lignina y se rompen los enlaces de la hemicelulosa dejando expuesta las cadenas de celulosa, después la celulosa se hidroliza produciendo oligosacáridos, para finalmente obtener glucosa de la fragmentación de esas cadenas (Chávez Vilcahuamán y Poma Fierro, 2021). La ventaja más destacable al emplear un ácido concentrado es el poder prescindir de la etapa de hidrólisis enzimática, no obstante, trae consigo desventajas como la formación de sales tras neutralizar los residuos, generación de inhibidores, el reactor es más propenso a la corrosión, pueden existir problemas relacionados a la seguridad industrial y se debe ocupar un mayor presupuesto al tratamiento de los residuos generados.

1.5 Compuestos inhibitorios

Los compuestos inhibitorios son sustancias químicas que generan una respuesta adversa en ciertos sistemas, estas moléculas pueden generar una inhibición de las enzimas empleadas para la hidrólisis de la celulosa en un experimento, un fármaco puede ver interceptado su efecto deseado debido a que otra molécula bloquea los receptores de la célula o una colonia de bacterias puede ver afectada la velocidad de reproducción debido a la concentración de cierta sustancia nociva para ellas.

La fermentación es un proceso químico en el que los microorganismos utilizan moléculas de sustrato para producir energía en forma de ATP (trifosfato de adenosina), al igual que para generar distintos subproductos en el camino dependiendo de la ruta metabólica que siga; por esta razón, la humanidad lo ha empleado como método de elaboración y de conservación de diferentes alimentos y bebidas. No obstante, existen ciertos inhibidores que pueden impactar de manera negativa a los organismos, impidiendo su ciclo de crecimiento o promoviendo la lisis celular; algunos de los compuestos más comunes que se producen al utilizar materia prima lignocelulósica son: ácidos orgánicos, furanos y fenoles (Suárez Medina et al., 2015; Arteaga et al., 2021).

Entre los ácidos orgánicos más comunes originados de la deshidratación de la hemicelulosa se encuentran el ácido acético y el ácido fórmico. Estos producen el efecto inhibitorio cuando en su forma no disociada penetran al interior de la célula aumentando la concentración de iones hidronio mediante su desacoplamiento, propiciando una disminución de la cantidad de ATP al emplearlo para accionar una ATPasa de membrana y bombear al exterior los protones y así evitar la acidificación del citoplasma y una posterior muerte celular (Jilani y Olson, 2023). Para el caso de los derivados de furano, estos se forman al romper los enlaces presentes entre el complejo lignina-celulosa-hemicelulosa y dependiendo de la cantidad de carbonos presentes en la molécula dan lugar a dos distintas moléculas: las glucosas, manosas y galactosas (hexosas) se transforman en 5-hidroximetil-furfural (HMF); mientras que las xilosas y arabinosas (pentosas) se convierten en furfuraldehído debido a las altas temperaturas empleadas en los procesos de hidrólisis. Del mismo modo que los ácidos alifáticos, los furanos pueden entrar por difusión en la membrana plasmática, pero interfieren en más aspectos como en la glucólisis, dañan la información genética y genera estrés oxidativo.

1.6 Justificación

Desde la perspectiva de la economía circular, el sargazo resulta ser un área de oportunidad dada su masiva cantidad y a que en los últimos años se han reportado investigaciones referentes a la composición y posibles aplicaciones como la obtención de distintos polímeros naturales. En un trabajo previo (Flores-Mendoza y López-Arenas, 2023) de los mismos autores de este proyecto de especialización, se planteó un primer diseño conceptual de una biorrefinería para transformar el sargazo en productos de valor agregado (polihidroxibutirato, alginato y biofertilizante) teniendo en consideración únicamente las operaciones unitarias necesarias para conseguir los productos deseados. No obstante, con la generación de compuestos inhibitorios, podemos establecer que existen ciertos elementos que pueden afectar al correcto funcionamiento de la biorrefinería. Por esa razón, en este trabajo de especialización se busca emplear el simulador de procesos Superpro Designer (SPD) para generar el diseño básico de una biorrefinería de sargazo y facilitar los balances de materia y energía para darle una mayor importancia a dos aspectos importantes: (1) la generación de compuestos que puedan inhibir el proceso de fermentación (tales como derivados de los furanos o metales pesados), y en su caso, determinar los procesos necesarios para su eliminación; y (2) otras posibles configuraciones para el diseño de la biorrefinería, que den como resultado la elaboración de distintos bio-productos, para lo cual se requiere definir la mejor ruta de síntesis del proceso a seguir.

1.7 Objetivos

Objetivo General

Proponer y evaluar el diseño conceptual de una biorrefinería de sargazo mediante simulación, analizando diferentes rutas de procesamiento y estudiando la inhibición fermentativa por compuestos sulfurados.

Objetivos Específicos

- Determinar las cantidades de compuestos sulfurados (furfuraldehído y HMF), y su posible efecto inhibitorio en las etapas fermentativas.
- Implementar diferentes tecnologías que permitan obtener biopolímeros y sus precursores como lo son: el alginato y el PHB (polihidroxibutirato), y el ácido láctico a partir de sargazo.
- Contrastar los resultados de las evaluaciones técnico-económicas y determinar el mejor diseño sustentable de los propuestos.
- Verificar el impacto social que tienen los arribazones del sargazo para los turistas y los locales en las ciertas playas de Quintana Roo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Recolección del sargazo

Tras la formación del cinturón de los sargazos la cantidad que empezó a llegar a las CCM se vio en aumento, diversos informes tanto de la Secretaría de Marina Armada de México, El Economista y de la gobernadora del estado de Quintana Roo informan que para los años 2019, 2020, 2021 y 2023 se recolectaron 38 892, 17 865, 54 000, 44 913 y 22 728 toneladas de sargazo, respectivamente, en las costas de Quintana Roo (Espinosa y Li Ng, 2020; Améndola, 2019, 2022; Secretaría de Marina, 2020; Secretaría de Marina, 2021; Salvador, 2023; Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2023).

La periodista Cinthia Salvador (2023) informó en el sitio de noticias “INFOBAE” que de las 80 playas que se encuentran en el estado de Quintana Roo únicamente 5 de ellas se encuentran libre de sargazo, siendo estas: Isla Contoy, Isla Mujeres Playa Norte, Centro y Sur, y Chiquilá. Mientras que entre las playas con una cantidad excesiva del alga se encuentran Tulum Arco Maya, Tulum Zona Hotelera Norte y Sur, Tulum Punta Piedra, Tulum Ruinas, Playa El Recodo. Punta Molas, Playa Xhanan, Playa Bonita y Playa Mezcalitos. Del total de playas en el estado, 41 de ellas tienen problemas con la cantidad de alga presentes en la costa y las más afectadas son las que se orientan hacia el sur, esto debido a que en Punta Nizur se instaló una barrera acuática de 200 metros en 2018, impidiendo que gran parte de las algas se extiendan hacia el norte, del mismo modo, la Isla de Cozumel actúa como una barrera parcial natural para las playas dentro de la zona de Playa del Carmen y Puerto Morelos. En particular, existe una Red de Monitoreo del Sargazo de Quintana Roo (2023, 2024) donde puede consultarse el estado actual del sargazo presente en las playas, como se muestra en la Figura 2.

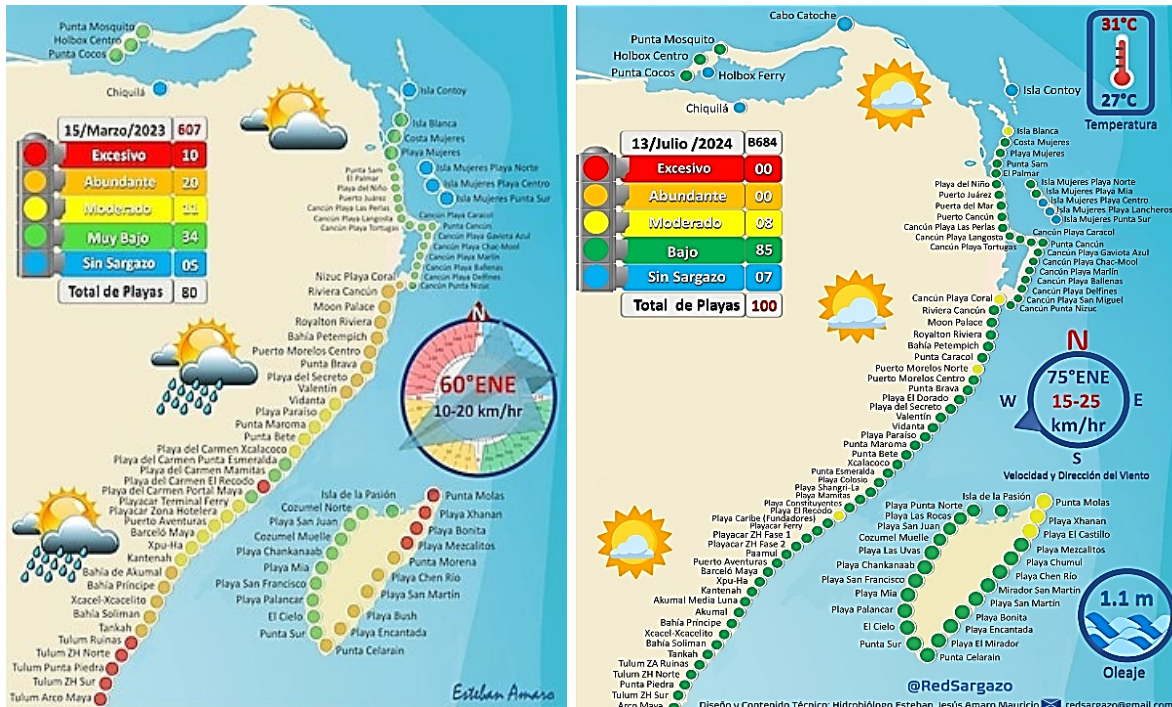


Figura 2.- Representación geográfica de las playas con presencia de sargazo para el 15/marzo/2023 y 18/julio/2024 (tomada de Red de Monitoreo del Sargazo de Quintana Roo)

2.2 Componentes del sargazo

La Figura 3 muestra los principales componentes presentes en la pared celular de las algas pardas, la cual se encuentra compuesta por distintos tipos de moléculas como polisacáridos, proteínas, polifenoles, iones, entre otros. De los distintos polisacáridos presentes se pueden mencionar los alginatos, que se encuentran unidos mediante un anión; los fucanos sulfatados y fucoidanos, que son polímeros de fucosa con numerosas sustituciones (p. ej., éster-sulfatos, acetilo, ramificación) para los primeros y diversos tipos de monosacáridos neutros y/o urónicos (p. ej., xilofucoglucurumananos, fucoglucurumanos y fucogalactanos) en las cadenas principales con sustituciones de L-fucosa sulfatada para los segundos. Otras moléculas que podemos encontrar son: celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas arabinogalactanas y polifenoles (Kloareg, 2021).

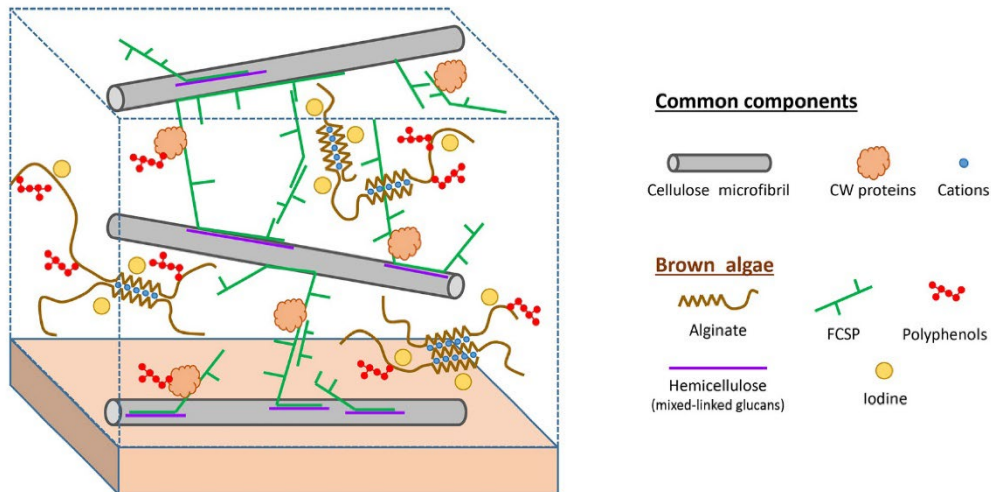


Figura 3.- Componentes presentes en la pared celular de las algas pardas (tomada de Kloareg, 2021).

2.3 Posible productos con valor agregado

Los componentes del sargazo pueden ser recuperados o transformados en productos con valor agregado. A nivel industrial existen dos distintos tipos de productos, los cuales pueden ser clasificados como: aquellos que se generan a gran escala y tienen un costo de venta relativamente bajo que se denominan *productos químicos básicos*, mientras que los que se generan a menor escala y por ende tienen un valor agregado más elevado son llamados *productos químicos especializados*. Dentro de la biotecnología existen diversas técnicas que emplean sistemas biológicos para la obtención de productos, y una de las herramientas que se ha empleado desde la antigüedad es la fermentación, puesto que, mediante ella se han elaborado distintos productos como el queso, el pan, la cerveza, licores, el vinagre, entre otros, sin embargo, en el último siglo se han empleado distintas especies de microorganismos para la producción de los denominados bioplásticos.

Tras la aparición de los plásticos con la baquelita en 1907, la innovación en los Estados Unidos de América permitió que en los años 80 se convirtiera en uno de los materiales más relevantes al sustituir materiales como aleaciones ligeras o el vidrio en el embalaje de los automóviles y por ende su producción se ha incrementado (Naeco, 2023). En la actualidad, la masiva cantidad de plásticos en existencia, la escasez y encarecimiento de los combustibles fósiles, el aumento de las regulaciones medioambientales, aunado a la resistencia que sus propiedades le aportan, han convertido a estos polímeros sintéticos en un gran problema medioambiental. Por esta razón, en 1980 se intensificó la búsqueda de polímeros naturales basados en carbono que tuvieran una mayor biodegradabilidad, al igual que provinieran de fuentes naturales y renovables. La principal diferencia entre aquellos polímeros sintetizados químicamente y los sintetizados en la naturaleza es que estos últimos son derivados de sistemas biológicos, como: ácidos nucleicos, polisacáridos, proteínas, por lo que se pueden definir como una macromolécula producida

por un sistema biológico como los animales, plantas o microorganismos. Estas moléculas cumplen diversas funciones biológicas vitales en los organismos que los producen como la preservación del material genético, la estabilidad celular y metabólica de la célula, y el almacenamiento de energía (Rodríguez et al., 2020).

Para que los bioplásticos puedan remplazar a los plásticos convencionales, estos deben asemejarse en ciertas propiedades que les confieren resistencia, así pues, estos materiales pueden obtenerse de tres maneras: 1) al emplear polímeros naturales y adicionarles plastificantes para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas, 2) mediante la aplicación de técnicas que empleen microorganismos, como la fermentación, para la elaboración de subproductos que funjan como materia prima en la formación de polímeros y 3) al igual que el método anterior se utilizan microorganismos, pero se forman de manera intracelular ya que estos los emplean como reservas de energía (Gonzales, 2019). Algunos ejemplos de los bioplásticos generados con los métodos anteriormente mencionados son: succinato de polibutileno (PBS), almidón termoplástico (TPS), ácido poliláctico (PLA) o los polihidroxialcanoatos (PHA). De lo anterior, en este proyecto se plantea usar el sargazo como fuente de carbono para la elaboración de ácido láctico (precursor del PLA) y PHB (un biopolímero), como una alternativa a los plásticos tradicionales.

El PLA es un poliéster termoplástico que puede ser obtenido tanto de manera química como biotecnológica. Para su obtención química se debe obtener lactonitrilo de la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para posteriormente hidrolizarlo y obtener una mezcla de isómeros de ácido láctico D y L ópticamente inactivo (ver Figura 4). Mientras que en la forma biotecnológica se emplean ciertos microorganismos comúnmente de los géneros *Lactobacillus*, *Carnobacterium*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, entre otros para la generación de su monómero el ácido láctico Figura X; la mayoría de los *Lactobacillus* únicamente producen una de las formas isoméricas del compuesto, sin embargo, algunas cepas pueden producir formas racémicas en las que el isómero predominante puede variar dependiendo de diversos factores como las condiciones de operación, el nivel de pH, la concentración de sustrato, etc. (Serna et al., 2011).

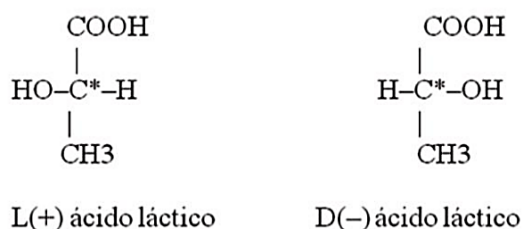


Figura 4.- Estructura química de los isómeros del ácido láctico.

La formación del ácido poliláctico puede llevarse a cabo de tres distintas maneras, pero solamente la polimerización a través de la formación de la lactida (diéster cíclico del ácido láctico) es empleada a nivel industrial y consiste en una policondensación a temperaturas elevadas para dar resultado a lo que denominan un “pre-polímero” de ácido láctico, el cual se somete posteriormente a un proceso de despolimerización a temperaturas entre 150 y 200 °C para formar el anillo dímero de lactida, tras lo cual se adiciona una especie activa que actuara como iniciador, dando paso a la apertura del anillo, y como propagador en la polimerización de lactonas (Báez, 2010). El PLA puede estar compuesto por tres estereoisómeros de la lactida (L-lactida, D-lactida y meso-lactida) y dependiendo de su constitución, sus propiedades como el punto de fusión, la velocidad de cristalización y el grado de cristalización variaran, un ejemplo es que aquellas estructuras formadas de un solo isómero tienden a tener un punto de fusión de 180 °C.

Los polihidroxicanoatos son polímeros sintetizados por diversas bacterias para la acumulación de reservas de energía cuando el medio en el que se encuentran tiene limitaciones de nitrógeno, fósforo, azufre, magnesio y/u oxígeno y la fuente de carbono se encuentra en abundancia y se almacena en forma de gránulos (Barbosa, 2005). Los PHA existen en diferentes formas y cada una se caracteriza según el grupo R sustituido que puede ser: poli 3-hidroxibutirato (CH_3), poli 3-hidroxivalerato (CH_2CH_3) y poli hidroxihexanoato ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), su estructura general se observa en la Figura 5. Algunas investigaciones sobre el proceso de acumulación de PHA indican que el número de gránulos por célula se define en las primeras etapas de acumulación y que la producción del polímero cesa cuando su contenido alcanza cerca del 80 % del peso celular en base seca, por lo que se entiende que existen restricciones físicas que impiden a la célula acumular más polímero a pesar de la disponibilidad de sustrato y actividad de la enzima PHA polimerasa (Lemos y Mina, 2015).

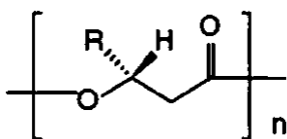


Figura 5.- Estructura química de los PHA.

Los dos tipos de mayor producción de PHA son el copolímero polihidroxibutirato-valerato (PHBV) y el homopolímero polihidroxibutirato (PHB), las unidades monoméricas de este último están todas en la configuración D(-) debido a la estereoespecificidad de las enzimas involucradas en la síntesis (Lee, 1996). Sin embargo, es un polímero altamente cristalino (55-80%), lo cual hace que sea un material excesivamente frágil, la temperatura de transición vítrea y de fusión son 5 y 175 °C respectivamente (Fuentes Olivera, 2015). Las propiedades de estos biopolímeros lo hacen atractivo para

su uso en ámbitos biomédicos dado que además de la biodegradabilidad son biocompatibles y no tóxicos con el cuerpo humano, al igual que como sustitutos de poliésteres en empaques para alimentos o plásticos industriales, e incluso para aditivos en alimentos o en tratamientos de aguas residuales. En la actualidad el costo del PHB es de 4 USD/kg producido por bacterias y es aproximadamente de 5 a 10 veces más caro que sus competidores que son el polipropileno y el polietileno (0.25-0.5 USD/kg), debido a que los costos de producción son muy elevados comparados con los de los plásticos derivados del petróleo (Ulloa, 2014).

2.4 Componentes inhibitorios en la fermentación

Como se mencionó en la sección 1.5, los compuestos derivados del furano se forman mediante los pretratamientos ácidos en la materia lignocelulósica. La Tabla 1 muestra el porcentaje de conversión alcanzado en la generación de HMF y furfuraldehído (Wooley et al., 1999).

Tabla 1.- Reacciones para la formación de HMF y furfuraldehído en la etapa de pretratamiento ácido

Reacción	Porcentaje de Conversión
<i>Xilosa</i> → <i>furfuraldehído</i> + 2 <i>agua</i>	10%
<i>Manano</i> → <i>HMF</i> + 2 <i>agua</i>	15%
<i>Galactano</i> → <i>HMF</i> + 2 <i>agua</i>	15%

El furfuraldehído inhibe la actividad de las enzimas gliceraldehido-3-fosfato deshidrogenasa, piruvato deshidrogenasa y en menor medida la hexoquinasa. Jilani y Olson (2023) mencionan que una concentración de 1 g/L de furfuraldehído puede reducir la actividad de las enzimas antes mencionadas hasta un 89, 23 y 90 %. Los furanos también pueden interactuar con el ADN bicatenario, produciendo fracturas de una sola cadena principalmente en sitios con tres o más bases de adenina o timina seguidas. El ADN plasmídico se ve afectado de mismo modo mediante inserciones, duplicaciones o deleciones en su cadena (Arteaga et al., 2021).

El efecto de estas moléculas en presencia de microorganismos suele reflejarse en la disminución de la velocidad específica de crecimiento y una menor producción de biomasa bacteriana. No obstante, existen ciertas cepas de bacterias y levaduras que pueden metabolizarlos en compuestos menos tóxicos como el alcohol furfúrico. Granados (2015) explica que, en *Pseudomonas putida*, el furfuraldehído se oxida a ácido furoico; posteriormente se activa con una coenzima A y se hidroxila en el carbono C5, después el anillo de lactona se rompe formando 2-oxoglutaril CoA para ser hidrolizado en 2-oxoglutarato; y finalmente, para ser metabolizado por el ciclo de los ácidos tricarboxílicos.

2.5 Modelado y Simulación

El objetivo del modelado de un sistema es buscar que represente el comportamiento real de un sistema, al igual que nos puede ayudar a diseñar experimentos que puedan resultar costosos, difíciles o que puedan conllevar un riesgo económico, ambiental o para la salud. Por esta razón, para abordar la construcción de un modelo desde una perspectiva sistemática es necesario tener en cuenta ciertos aspectos como que la problemática debe estar claramente definida, lo que delimitará el proceso, el objetivo del modelado y los criterios de validación. La Figura 12 describe de forma esquemática los pasos a seguir para llevar a cabo el procedimiento de generación de un modelo, estos se describen brevemente a continuación.

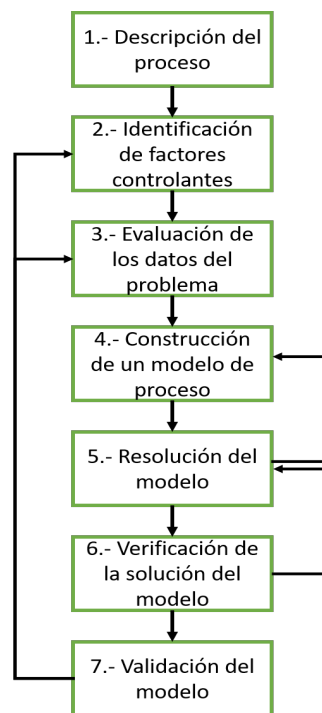


Figura 12.- Metodología de los 7 pasos (adaptada de Hangos y Cameron, 2001)

1. Descripción del proceso: En esta sección se determina el grado de complejidad y detalle del sistema, y se verá reflejado en la formulación de los objetivos.
2. Identificación de factores controlantes: En esta etapa se identifican los fenómenos físicos, químicos y biológicos que toman lugar en el sistema que se busca modelar.
3. Evaluación de los datos del problema: Dado que la mayoría de los modelos de sistemas reales tienen como fundamento conocimientos de ingeniería de procesos para determinar la estructura de los compuestos y valores de los parámetros de modelo (modelos de caja gris), por lo que es posible encontrar datos en la literatura o estimados que no sean viables.

4. Construcción de un modelo del proceso: Se deben plantear las ecuaciones de balance de materia y energía, al igual que las expresiones algebraicas conocidas con el fin de establecer sistemas algebraico-diferenciales para modelos dinámicos y sistemas algebraicos para modelos estáticos.
5. Resolución del modelo: Una vez establecidos los sistemas, se debe implementar el procedimiento de solución y asegurarse que el planteamiento del problema es el adecuado. En este paso se emplean comúnmente métodos numéricos para resolver los sistemas de ecuaciones obtenidos de los balances de materia y energía
6. Verificación de la solución del modelo: Se debe realizar un análisis que verifique que las tendencias del modelo son lógicas y adecuadas.
7. Validación del modelo: Una vez el modelo ha sido completado, debe comprobarse los resultados para verificar que las observaciones y suposiciones realizadas sean las correctas. La validación puede hacerse de distintas formas: mediante un experimento, comparando con otro modelo empleando el mismo problema, comparar los datos obtenidos con los datos del proceso, entre otros.

Para el modelado y simulación de este proyecto se utilizó el *software SuperPro Designer* (SPD), el cual es una herramienta de simulación discreta y de estado estacionario que permite predecir las operaciones de procesos tanto continuos como por lotes, facilitando así el análisis de los balances de materia y energía mediante la implementación de distintos métodos numéricos, y con ello darle una mayor importancia al estudio de la sensibilidad del sistema frente a cambios en los distintos parámetros y variables de operación, con la finalidad de emplear técnicas de optimización para determinar las mejores condiciones de operación. La integración de aspectos técnicos, económico y de impacto ambiental al modelado de un sistema permite estimar los costos de producción la inversión de capital necesaria, los costos de operación, calcular las emisiones de gases y la generación de residuos, de igual forma permite evaluar estrategias para minimizar los desechos y mejorar la sostenibilidad de los proyectos planteados. No obstante, el software tiene ciertas desventajas como no poder realzar simulaciones dinámicas, su capacidad para manejar modelos cinéticos avanzados es limitada comparado con otras herramientas, las licencias comerciales pueden ser una barrera para ciertos grupos, entre otras.

3. METODOLOGIA

El presente proyecto se desarrolló en cinco etapas distintas, las cuales se presentan en la Figura 6 y se describen a continuación.

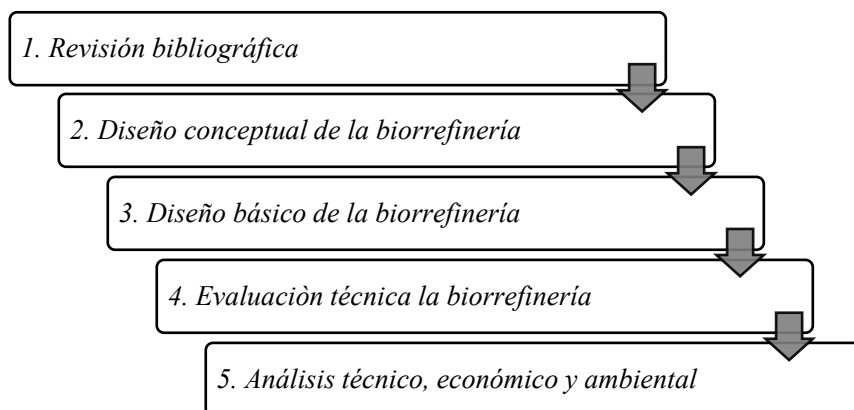


Figura 6.- Metodología general para el diseño y evaluación de la biorrefinería

1. **Revisión bibliográfica:** Se realizó una búsqueda de documentación para lograr identificar aspectos importantes que afecten directamente a la resolución de los balances de materia y energía de la simulación como: la composición del alga, la cantidad de alga disponible anualmente, la cantidad de derivados del furano que se generan al igual que su concentración y propiedades fisicoquímicas pertinentes, las reacciones que se llevan a cabo para la transformación de la materia prima a los productos, entre otros.
2. **Diseño conceptual de la biorrefinería:** Es la fase previa al diseño concreto de la biorrefinería y se formula el planteamiento de las tecnologías a implementar teniendo en cuenta los posibles materiales a emplear, las dimensiones necesarias, el ciclo de procesamiento y las restricciones impuestas para realizar los balances de materia y energía empleando diagramas de bloque del proceso.
3. **Diseño básico de la biorrefinería:** Se implementan los diagramas de flujo del proceso en el software SPD en donde se establecerán las condiciones de operación y el diseño de los equipos empleados para el procesamiento de la materia prima.
4. **Modelado y simulación de la biorrefinería:** Se plantea desarrollar un modelo que represente el comportamiento lo más fidedigno a la realidad, pero a la vez que no exprese el mismo nivel de complejidad del proceso real.

5. Análisis técnico, económico y ambiental: Se realizan evaluaciones de costos e impacto ambiental para determinar la viabilidad del proceso y verificar si existe posibilidad de optimizarlo.

3.1 Caracterización del sargazo

En vista de que la composición de las algas del género *S. natans* y *S. fluitans* que llegan a las playas mexicanas varía respecto a la estación del año, se recurrió a diversas publicaciones con el propósito de conseguir un estimado de los compuestos presentes. Una de las caracterizaciones más completas (Paredes-Camacho et al., 2023) reportaron una composición global de 20 % de fibra, 5.36 % de grasas, 5.47% de proteínas, 38.77 de carbohidratos, 18.4% de cenizas. El contenido de humedad reportado para el sargazo recolectado en las CCM es 11-12% (López-Sosa et al., 2020; Paredes-Camacho et al., 2023).

No obstante, para llevar a cabo el modelado y simulación de la biorrefinería, se requiere una composición más detallada de los carbohidratos que participan en las reacciones de transformación. De manera que se recopilamos otras composiciones en función de los componentes participantes, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.- Cantidad de compuestos presentes en el sargazo (base seca)

Compuesto	Porcentaje (%)	Referencia
Alginato de calcio	21.1 – 24.5	Bertagnolli et al. (2014)
Celulosa	9.2 – 13.1	López-Sosa et al. (2020)
Hemicelulosa	7.7 – 8.7	
Lignina	8.7 – 10.5	
Otros extractivos	67.7–74.4	
Metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn)	0.0043 - 0.0152	Tejada-Tejada et al. (2021)

3.2 Diseño conceptual de la biorrefinería

El primer paso es la elaboración de un diagrama de bloques que muestre las etapas necesarias para la obtención de los productos deseados. La Figura 7 muestra algunos de los diversos procesos a los que se podría someter el sargazo para su aprovechamiento en la transformación de bioproductos con un nuevo valor agregado, entre los cuales destacan el alginato, ácido láctico, PHB, biofertilizante y la generación de energía eléctrica. En el diagrama se pueden observar 6 diferentes colores y dos distintos recuadros; los rectángulos con bordes rectos que se encuentran dentro de la línea punteada representan

las operaciones unitarias empleadas y los rectángulos con bordes redondos los productos obtenidos y la materia prima.

Dado que se proponen distintas configuraciones empleando una misma materia prima, y se pretende comprender como afecta el modificar tanto los productos adquiridos como los procesos empleados en el rendimiento de la biorrefinería, los casos de estudio se representan mediante un color diferente en la Figura 7, y se explican enseguida.

Caso I. Obtención de alginato:

Esta sección se encuentra en recuadros de color verde y cuenta con dos secciones, la extracción y su purificación. No obstante, ya que no se hace uso de la biomasa lignocelulósica, por lo que ésta debe tratarse como un residuo industrial, generando un costo extra para su disposición.

Caso II. Obtención de alginato, producción de PHB y biofertilizante:

La primera sección se muestra en recuadros de color verde, que consiste en la extracción y purificación del alginato; posteriormente, con hidrolisis, fermentación, separación y secado se obtienen PHB y biofertilizante (sección amarilla). El pretratamiento y sacarificación corresponden a la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, y se presentan en color naranja para destacar que están presentes en los casos II y III.

Caso III. Obtención de alginato, producción de ácido láctico y biofertilizante:

La primera sección se representa en recuadros de color verde y al igual que el caso anterior; seguido por hidrolisis (pretratamiento y sacarificación en color naranja) y fermentación para la transformación de la glucosa en ácido láctico, y una separación y secado para el biofertilizante (estas etapas se encuentran de color azul).

Caso IV. Obtención de bioenergía:

Dentro de los recuadros de color gris se muestran las operaciones unitarias necesarias para la cogeneración de energía eléctrica y vapor de agua. Primero, se compacta el sargazo en la fase de extrusión para ser pre-calentados con el aire que proviene de la caldera, y cuando pase a esta operación unitaria la energía necesaria sea menor. Finalmente, la turbina generará electricidad y la caldera convertirá el agua en vapor mediante la combustión del sargazo.

3.3 Diseño básico: Tecnologías de valorización del sargazo

Durante esta etapa de diseño se definen los equipos empleados para cada operación unitaria, junto a sus condiciones de operación y los cambios que ejerce en la materia para su transformación en los distintos productos, según el caso de estudio; también se establecen las reacciones que ocurren y las condiciones de operación.

Dado que en tres de los casos de estudio (I, II, III) se realiza la extracción de alginato, únicamente se ahondarán sus secciones en la descripción del primer caso de estudio, y en las demás solo se mencionará.

Caso I: Producción de Alginato

Para la obtención del alginato de sodio se contemplaron cuatro secciones: acondicionamiento de la materia prima, extracción del alginato, purificación del alginato y acondicionamiento de los residuos sólidos; y se pueden diferenciar en la Figura 8 por los colores de cada sección. A continuación, se describe cada sección brevemente, de acuerdo con la metodología ya propuesta.

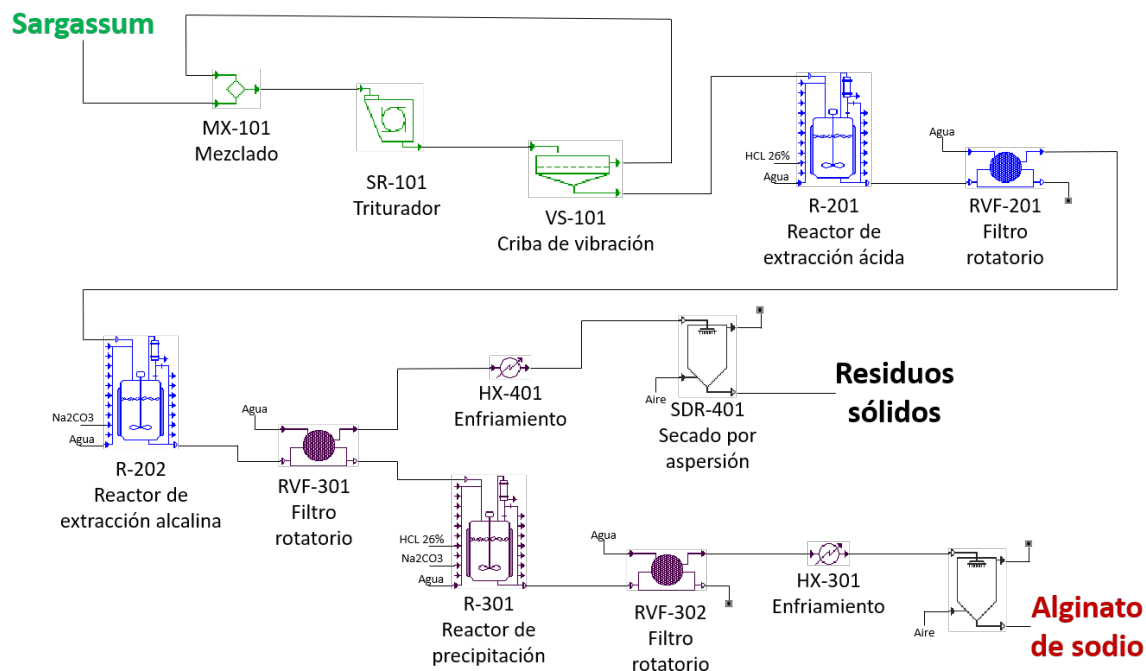
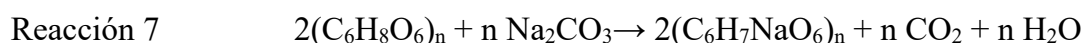
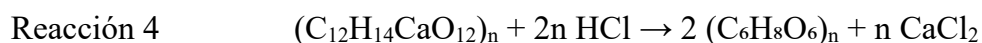


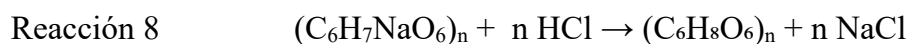
Figura 8.- Diagrama de flujo del proceso para la extracción de alginato de sodio.

Sección de acondicionamiento: Al inicio del proceso, la reducción del tamaño de partículas es de importancia para incrementar el área de contacto y de mismo modo la transferencia de materia, lo cual se logra mediante el equipo SR-101 y para garantizar que no se supere el tamaño deseado se realiza un cribado en VS-101.

Sección de extracción de alginato: Tras la trituración del alga, se pasa al reactor de tanque agitado R-201 donde se le adiciona agua y ácido clorhídrico con el fin de romper los enlaces presentes entre la celulosa (reacción 1), hemicelulosa (reacción 2) y la lignina (reacción 3); al igual que transformar el alginato de calcio en ácido algínico (reacción 4); del mismo modo, una parte de los xilanos presentes pasará a convertirse en furfuraldehído (reacción 5) y parte de los mananos y galactanos en HMF (reacción 6). Posteriormente se busca la eliminación de los restos del ácido por el filtro rotatorio RVF-201 y llevar a cabo una extracción alcalina en el reactor R-202 mediante la adición de carbonato de sodio, con el objetivo de obtener alginato de sodio representado en la reacción 7.



Purificación del alginato de sodio: Después, la fase líquida que contiene los alginatos solubles y los derivados de los furanos se separa de la fase sólida que contiene la biomasa lignocelulósica; donde esta última se seca y obtiene un valor negativo al ser considerado un residuo sólido, mientras que la primera es enviada al reactor R-301 y tratada con ácido clorhídrico y carbonato de calcio para precipitar en alginato de sodio representada por las reacciones 8 y 9, respectivamente. Finalmente, para eliminar cualquier reactivo sobrante se emplea el filtro rotatorio RVF-302 y para obtenerlo en forma de polvo pasa por el secador por aspersión SDR-301.



Caso II: Producción de Alginato, PHB y Biofertilizante

Dado que el pretratamiento ácido es necesario para poder tener acceso a la celulosa y es una de las secciones necesarias para obtener el alginato, se plantea dejar el

acondicionamiento de la materia prima, la extracción ácida y purificación del alginato tal cual se describió en el caso anterior. Por otro lado, los “sólidos restantes” pasarán por las secciones de fermentación y de purificación del PHB, y son distinguidas en el diagrama de flujo de la Figura 9 con los colores rojo y negro, respectivamente.

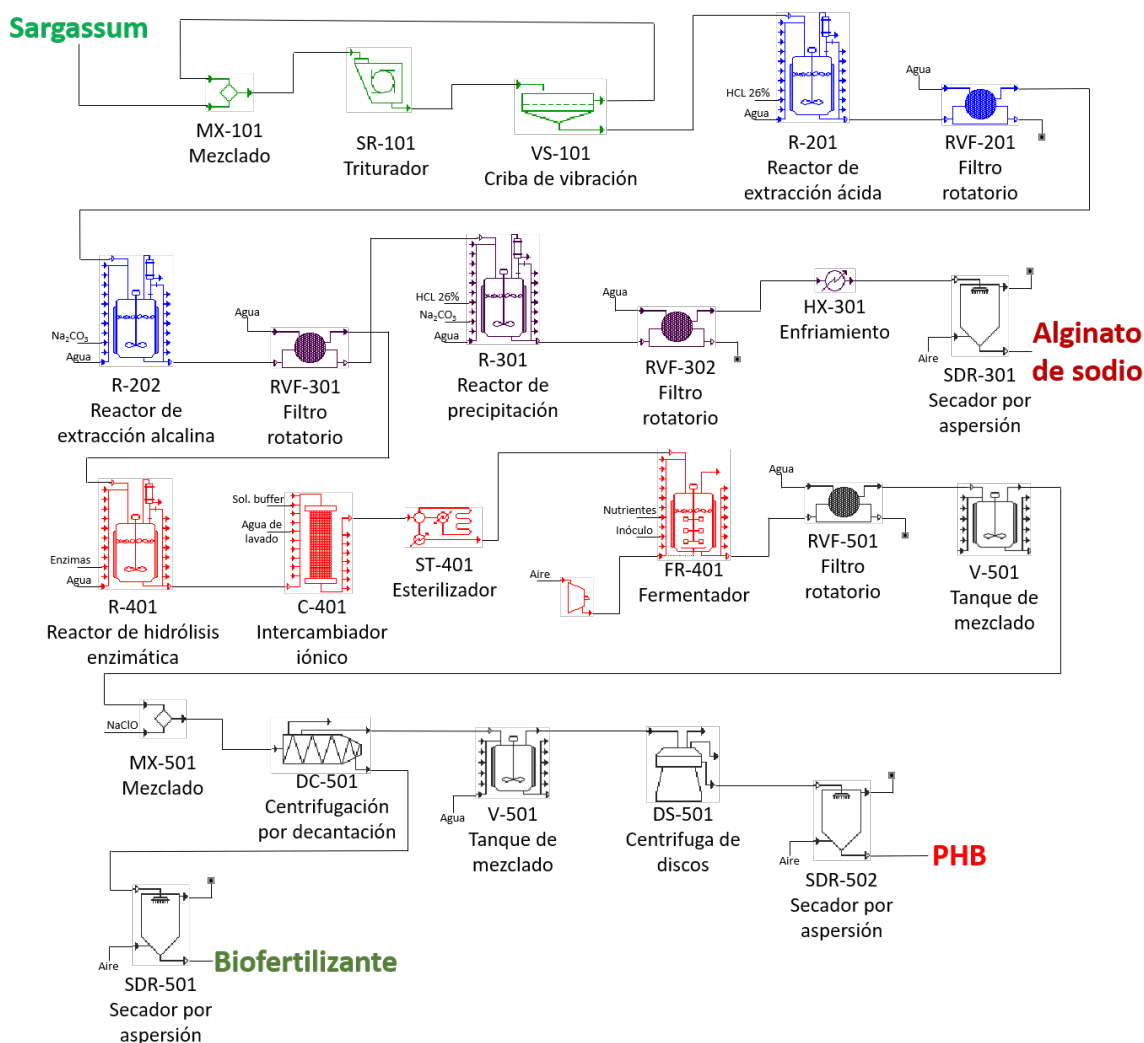
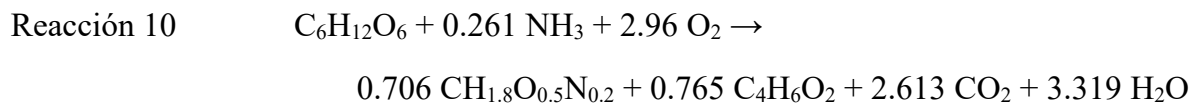


Figura 9.- Diagrama de flujo del proceso para la producción de alginato de sodio, PHB y fertilizante.

Sección de fermentación: Durante esta etapa, la biomasa lignocelulósica se hidroliza sus enlaces presentes en la celulosa, mediante la aplicación de un coctel de glucanasas en el Reactor R-401. Es importante tener en cuenta que el sargazo acumula metales pesados, por lo que el cromatógrafo C-401 se encarga de eliminar estos compuestos; y el equipo ST-401 esteriliza la glucosa para evitar cualquier contaminación y producción de compuestos no deseados. Posteriormente se fermenta la glucosa como fuente de carbono

en el reactor FR-401 usando *Azohydromonas australica* ($\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$) para la producción del PHB como se observa en la reacción 8 (López-Arenas et al., 2017).

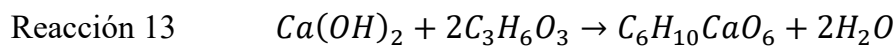
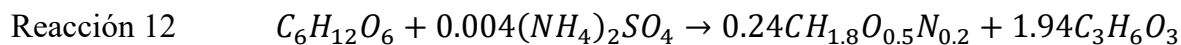
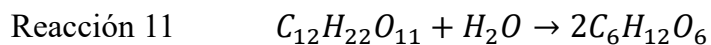


Purificación de PHB y biofertilizante: Una vez que las bacterias produzcan el polihidroxibutirato de manera intracelular, se separan de la fase acuosa por medio del filtro rotatorio RVF-501 y tras añadirle el tensoactivo dodecilsulfato sódico en un tanque de almacenamiento (V-501) se produce la lisis celular, liberando el PHB en el medio. Posteriormente se utiliza hipoclorito de sodio para que en la centrífuga de discos DS-501 se separe el PHB del resto de los compuestos lignocelulósicos y los restos lisados de los microorganismos, que en el equipo SDR-501 se secan para producir biofertilizante; y el sobrenadante es llevado a una centrifuga DS-502 para la eliminación del tensoactivo y a un secador por aspersión SDR-502 para obtener el bioplástico en forma sólida y con una pureza de aproximadamente el 95%.

Caso III: Producción de Alginato, Ácido láctico y Biofertilizante

Del mismo modo que en la producción de PHB, para la producción de ácido láctico se implementaron las secciones de acondicionamiento, extracción de alginato y purificación de alginato previamente descritas. No obstante, al cambiar el compuesto a generar (en este caso para ácido láctico), los procesos de purificación, el microorganismo ocupado y los nutrientes necesarios para su crecimiento cambian (Anaya-Reza y López-Arenas, 2018), como se muestra en la Figura 10.

Sección de fermentación: En esta sección, se realiza la hidrólisis enzimática para liberar la glucosa al medio y se eliminan algunos metales pesados con los equipos R-401 y C-401. Seguido, se adicionan los nutrientes necesarios (extracto de levadura, sulfato de amonio, triptona e hidróxido de calcio) a la corriente principal con la intersección MX-401 para ser esterilizado y posteriormente ser usada para el crecimiento de *Lactobacillus casei Rhamnosus* ($\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$) en el reactor de tanque agitado FR-401. Las reacciones 11-13 representan las principales reacciones que se llevan a cabo.



Purificación del ácido láctico y biofertilizante: La etapa de purificación empieza con el filtro rotatorio RVF-501, el cual elimina las bacterias y cualquier resto lignocelulósico al

separar la fase sólida de la líquida, y se trasladan al secador rotatorio RDR-501 para disminuir la mayor cantidad de agua y obtener un biofertilizante. La fase acuosa entra al reactor V-501 y se le añade ácido sulfúrico para promover la disociación del lactato de calcio, formando yeso y recuperando el ácido láctico como se muestra en la reacción 12.

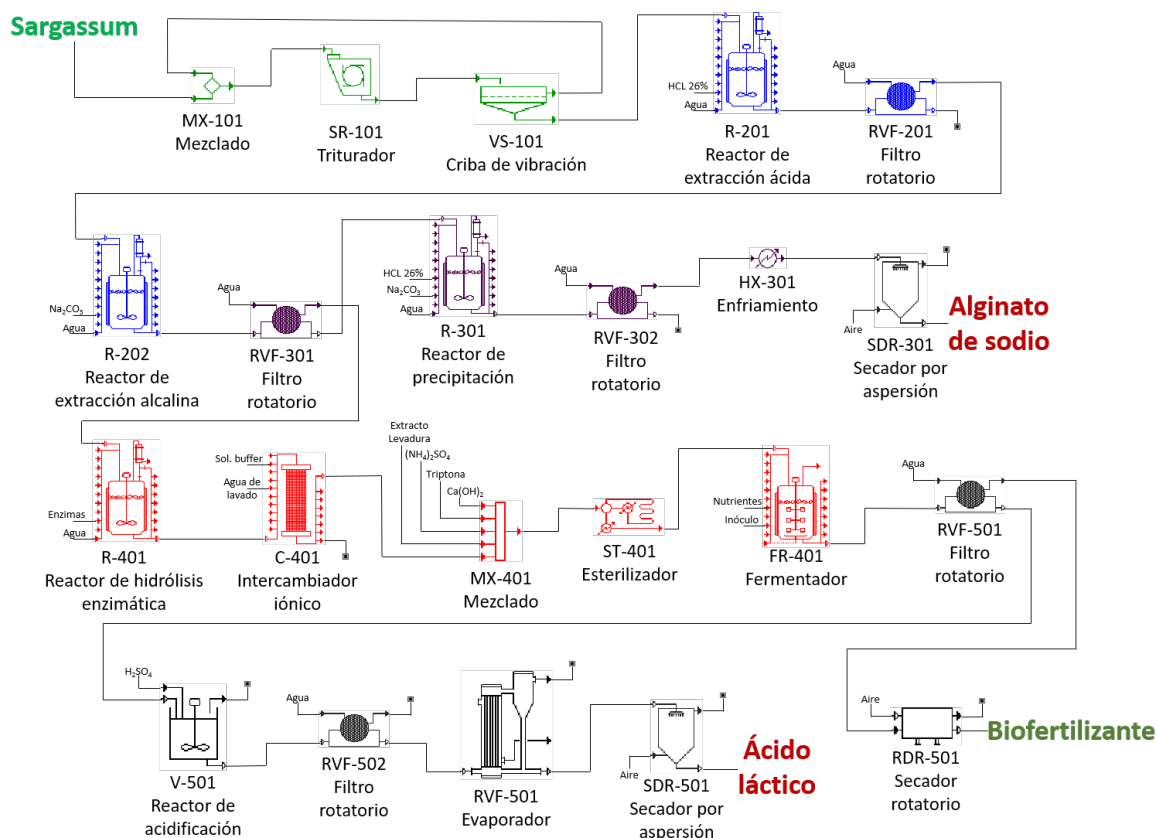
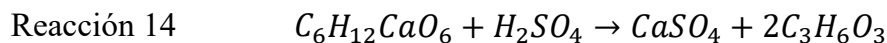


Figura 10.- Diagrama de flujo del proceso para la producción de alginato de sodio, ácido láctico y biofertilizante.

Caso IV: Producción de bioenergía

Para el caso de esta configuración se plantea la cogeneración de energía eléctrica y de vapor de agua, como se muestra en la Figura 11. Se cuenta con una única sección donde en primer lugar se disminuye el tamaño de partícula del sargazo seco en el triturador SR-101, para ser compactado en pequeños pellets en el equipo XD-101 para posteriormente pre-calentarlos con el aire que proviene de la caldera, y cuando pase a esta operación unitaria representada por el equipo SG-101 la energía necesaria sea menor. Finalmente la turbina SE-101 genera la electricidad y la caldera convierte el agua en vapor.

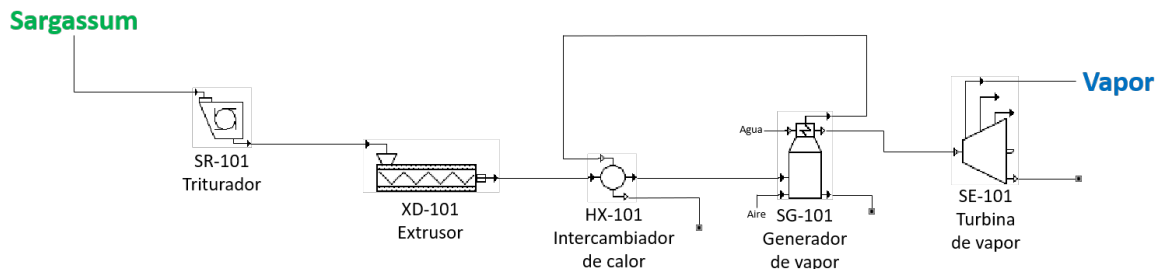


Figura 11.- Diagrama de flujo del proceso para la cogeneración de bioenergía a partir de sargazo.

3.4 Evaluación de la biorrefinería

Para determinar si un proyecto ha tenido éxito se pueden emplear cierto tipo de herramientas para medirlo, un ejemplo de esto son las evaluaciones puesto que permite determinar si un proyecto es viable y cuáles serán los resultados esperados. Las evaluaciones en los proyectos son un proceso que tienen como objetivo determinar su eficacia, eficiencia, relevancia, viabilidad y sostenibilidad, y constan de varias fases como la definición del objetivo y los criterios de evaluación, la recopilación de datos, el análisis de los datos y la presentación de los resultados. En este proyecto se realizarán 3 tipos de evaluaciones que se describirán a continuación:

- La **evaluación técnica** está compuesta por una serie de análisis matemáticos mediante los cuales se podrán conocer ciertos aspectos a tomar en cuenta a la hora de implementar el proceso real, entre ellos se encuentran métodos numéricos iterativos, integración, diferencial y optimización para solucionar los balances de materia y energía, la simulación de procesos, la resolución de las cinéticas en reactores químicos y biológicos y la optimización de procesos. Para que los cálculos se realicen de manera correcta es importante ingresar las reacciones balanceadas en su estado estacionario, las cantidades de reactivos adecuadas, y establecer las composiciones de los compuestos presentes, para con ello determinar el tamaño de lote, la producción anual del producto principal y de los subproductos, al igual que sus rendimientos respecto a la materia prima, el total de equipos utilizados, los tiempos de operación de cada lote y el tiempo de operación anual de la planta.
- La **evaluación económica** tiene como finalidad medir la eficiencia de la inversión realizada y su posible rendimiento a través del tiempo, este análisis es importante porque con los resultados obtenidos se puede estimar si la inversión realizada será rentable o no. El software SPD emplea métodos contables y de costos unitarios sin contar con flujos de efectivo, los parámetros utilizados son: el tiempo de recuperación

de la inversión (TRI) y el retorno sobre la inversión (RSI), las cuales se calculan según las ecuaciones 1 y 2. La finalidad de estos criterios es poder determinar la rentabilidad de la biorrefinería al cumplir ciertos requisitos, los cuales son: (a) el RSI debe ser mayor a 20%, y (b) el TRI debe tener un valor deseablemente menor a 3 años.

$$TRI = \left(\frac{\text{Ingresos Netos}}{\text{Costo de Inversión}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$RSI = \frac{\text{Inversión Total Inicial}}{\text{Ganancia Anual}} \quad (2)$$

- La **evaluación de impacto ambiental** es un análisis que permite identificar, predecir y evaluar impactos potenciales que acarrea la inicialización de un proyecto en el medio ambiente a corto, mediano y largo plazo. El software SPD cuenta con indicadores ambientales, pero en este proyecto solo se tomarán en cuenta los siguientes: el CO₂ equivalente generado por las reacciones químicas/biológicas o por la generación de electricidad (huella de carbono), el consumo de recursos naturales empleados en la cadena de producción (agua, electricidad, vapor, entre otros.) y el cálculo de la cantidad de residuos sólidos, efluentes líquidos y emisiones gaseosas generadas.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN

4.1 Consideraciones y suposiciones

Para la evaluación técnica, se implementan los casos I, II y III en modo de operación por lote; mientras que el caso IV opera en modo continuo. Los balances de materia y energía se evalúan en el punto final de operación (para el modo lote) y en estado estacionario (modo continuo). Los balances de cada operación unitaria (ver Tabla 3) están incluidos en el simulador modular Superpro Designer, el cual también incluye métodos numéricos para la resolución de los sistemas de ecuaciones algebraicas generados.

Para la evaluación económica, se hacen las siguientes suposiciones: el tiempo de operación anual consta de 336 días, el periodo de depreciación es de 15 años, la tasa de impuesto sobre la renta del 30% y todos los costos se encuentran en dólares estadounidenses.

Tabla 3.- Número de ecuaciones presentes en los balances de materia y energía (B. M&E).

Caso I No. Componentes totales: 21 No. Reacciones totales: 9		Caso II No. Componentes totales: 28 No. Reacciones totales: 10		Caso III No. Componentes totales: 35 No. Reacciones totales: 13		Caso IV No. Componentes totales: 13 No. Reacciones totales: 2	
Op. Unitaria	No. B. M&E	Op. Unitaria	No. B. M&E	Op. Unitaria	No. B. M&E	Op. Unitaria	No. B. M&E
MX-101	9	MX-101	9	MX-101	9	SR-101	9
SR-101	9	SR-101	9	SR-101	9	XD-101	9
VS-101	9	VS-101	9	VS-101	9	HX-101	14
R-201	17	R-201	17	R-201	17	SG-101	14
RVF-201	16	RVF-201	16	RVF-201	16	SE-101	2
R-202	18	R-202	18	R-202	18		
RVF-301	17	RVF-301	17	RVF-301	17		
R-301	12	R-301	12	R-301	12		
RVF-302	11	RVF-302	11	RVF-302	11		
HX-301	3	HX-301	3	HX-301	3		
SDR-301	5	SDR-301	5	SDR-301	5		
HX-401	9	R-401	9	R-401	9		
SDR-401	11	C-401	10	C-401	10		
		ST-401	8	MX-401	12		
		FR-401	14	ST-401	12		
		RVF-501	10	FR-401	15		
		V-501	11	V-402	15		
		MX-501	12	RVF-501	15		
		DS-501	12	RDR-501	12		
		SDR-501	14	V-501	9		
		V-502	10	RVF-502	9		
		DS-502	10	EV-501	9		
		SDR-502	12	SDR-501	11		
Ecuaciones totales	146	Ecuaciones totales	258	Ecuaciones totales	264	Ecuaciones totales	48

4.2 Cantidad y composición del sargazo

Debido a que las playas en las cuales se acumula la mayor cantidad de sargazo se encuentran al sur del estado de Quintana Roo y a que el centro económico de Tulum es uno de los más afectados por el alga, los casos de estudio se llevaron a cabo tomando en cuenta la mayor cantidad recolectada en la zona de Tulum (4,550 toneladas en el año 2023) y una de las menores cantidades reportadas que llegó en todo el estado de Quintana Roo en los últimos años (22,727 toneladas en el 2023 y 37,000 toneladas en el 2024). Se considera que el material recolectado contiene un porcentaje de humedad del 12 % reportado por Alzate-Gaviria, et. al (2021) y dado que para procesarlo requiere que sea materia seca, se debe calcular la cantidad en base seca, las cuales serían 4 mil toneladas como límite mínimo y 20 mil toneladas como el máximo.

En particular, para la evaluación de la biorrefinería en este proyecto se calcularon los valores promedio para cada uno de los compuestos (en la revisión bibliográfica reportada en la sección 3.1) como se presentan en la Tabla 4. Las propiedades fisicoquímicas de cada componente fueron obtenidas de la base de datos del software SPD. No obstante, esta base no contenía algunos compuestos fundamentales como el HMF y el furfuraldehído, por lo cual fueron adicionados manualmente.

Tabla 4.- Composición del sargazo empleada en las simulaciones de las biorrefinerías.

Compuesto	Composición base húmeda (% masa)	Composición base seca (% masa)
Alginato de calcio	20.24	23.00
Celulosa	9.81	11.15
Lignina	8.45	9.60
Galactano*	2.37	2.69
Manano*	2.13	2.42
Xilano*	1.44	1.64
Metales pesados	0.01	0.01
Otros sólidos	43.55	49.49
Humedad	12.00	0.00

* Compuestos que forman parte de la hemicelulosa

4.3 Efecto de los compuestos inhibitorios

Uno de los objetivos de este estudio es establecer una configuración en la cual la generación de compuestos derivados del furano no interfiriese en los procesos de la hidrólisis enzimática y de fermentación para los Casos II y III. No obstante, en la etapa de hidrólisis ácida, tanto la cantidad formada como la concentración alcanzada fueron relativamente bajos para causar repercusión alguna, siendo estas de 67.07 Kg con una concentración de 0.16 g/L para el HMF y 13.42 Kg con una concentración de 0.03 g/L

para el furfuraldehído. La concentración alcanzada no logra llegar a la necesaria para una inhibición en la fermentación de 3.8 g/L para el HMF y 1 g/L para el furfuraldehído debido a que los procesos son altamente diluidos. Aunado a lo anterior, estos compuestos se encuentran la fase acuosa por lo que gran parte de estos compuestos se elimina mediante los equipos de filtración rotatorios al vacío. La Figura 13 muestra las concentraciones de HMF y furfuraldehído generados en la etapa del pretratamiento ácido al igual que las cantidades que se eliminan los filtros rotatorios y los remanentes en las demás corrientes del proceso.

Con lo anteriormente mencionado se puede establecer que agregar una fase de detoxificación al proceso no es necesario puesto que, en primer lugar, la hidrólisis ácida logra solubilizar solo una pequeña parte de la celulosa presente por lo que esta última, que se encuentra en la fase sólida, se envía al Reactor de hidrólisis enzimática (R-401) y los derivados de los furanos, que se encuentran en la fase acuosa se van a la etapa de purificación del alginato. En segundo lugar, el filtro RVF-201 elimina aproximadamente el 99% de estos compuestos, pasando de tener 67.07 kg a 0.56 kg de HMF y de 13.42 a 0.11 kg de furfuraldehído; del mismo modo, el equipo RVF-302 elimina gran parte de los remanentes antes de pasar al secado del alginato.

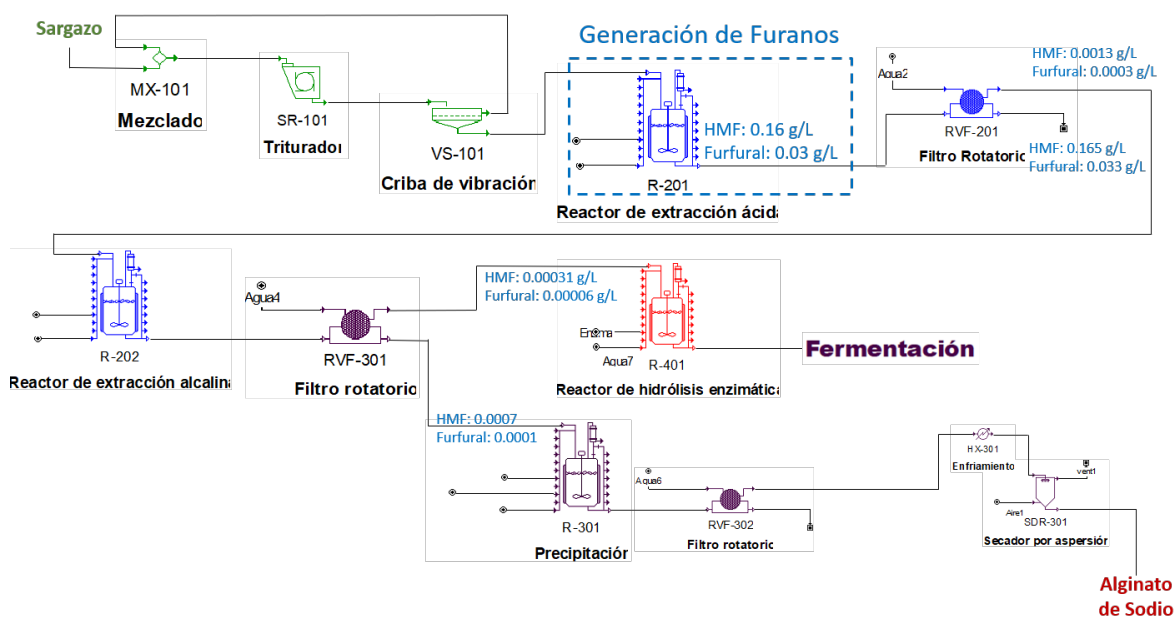


Figura 13.- Diagrama de flujo del proceso implementado en *SuperPro Designer* con las cantidades de HMF y furfuraldehído generados, y su probable ruta de eliminación.

4.4 Análisis Técnico-Económico-Ambiental de los casos de estudio

La implementación de las distintas configuraciones a estudiar inició considerando 45 toneladas por lote a tratar. No obstante, debido a que el tiempo de duración varía para cada caso de estudio, y eso a su vez afecta al número de lotes de producción al año, se estandarizó la cuota de materia prima anual entrante marcando como límites inferior y superior como: la menor cantidad recolectada de sargazo reportada para las playas de Tulum y la menor cantidad de sargazo que ha llegado a las costas de Quintana Roo en últimos años. La Tabla 5 muestra la cifra correspondiente a tratar por lote para cada uno de ellos. Estos valores son obtenidos de acuerdo con el número de equipos, tiempo de latencia antes de iniciar el siguiente ciclo y los lotes producidos anualmente correspondientes a cada uno de los casos de estudio son: I) 12 equipos, 31.0 horas y 255 lotes-año; II) 22 equipos, 37.3 horas y 212 lotes-año; III) 21 equipos, 371.0 horas y 252 lotes-año varían; y IV) 5 equipos, sin tiempos de latencia y ciclo (se implementó como proceso continuo en estado estacionario).

Tabla 5.- Cantidad de sargazo a tratar, modificando la alimentación anual.

Cantidad anual (t)	Caso I (t/lote)	Caso II (t/lote)	Caso III (t/lote)	Caso IV (t/h)
4,000	15.69	18.87	15.87	0.50
8,000	31.38	37.74	31.75	1.00
12,000	47.06	56.60	47.62	1.51
16,000	62.75	75.47	63.49	2.01
20,000	78.43	94.34	79.36	2.52

En la Figura 14 se muestran los tiempos y el orden de acción de los equipos empleados para los casos I, II y III; adicionalmente, se destacan con distintos colores los lapsos de tiempo empleados en cada lote: azul para el primero, naranja para el segundo, rosa para el tercero y así sucesivamente. Mediante los diagramas se puede observar que con la incorporación de más de un equipo del mismo tipo se puede reducir el tiempo de duración de cada lote, esto es notorio en el caso A al ver que el Fermentador STG01>>FR-401 comienza al transcurrir 155 horas, en cambio, el Fermentador principal FR-401 inicia en el tiempo 122 h y termina aproximadamente en el tiempo 207 h, durando un total de 85 horas; por lo que al tener un segundo y tercer fermentador (STG01>>FR-401 y STG02>>FR-401) se reduce el tiempo de espera de 85 a 31 horas. Dado que el Caso IV se encuentra en modo continuo, todos los equipos se encuentran en uso durante todo el tiempo de operación anual.

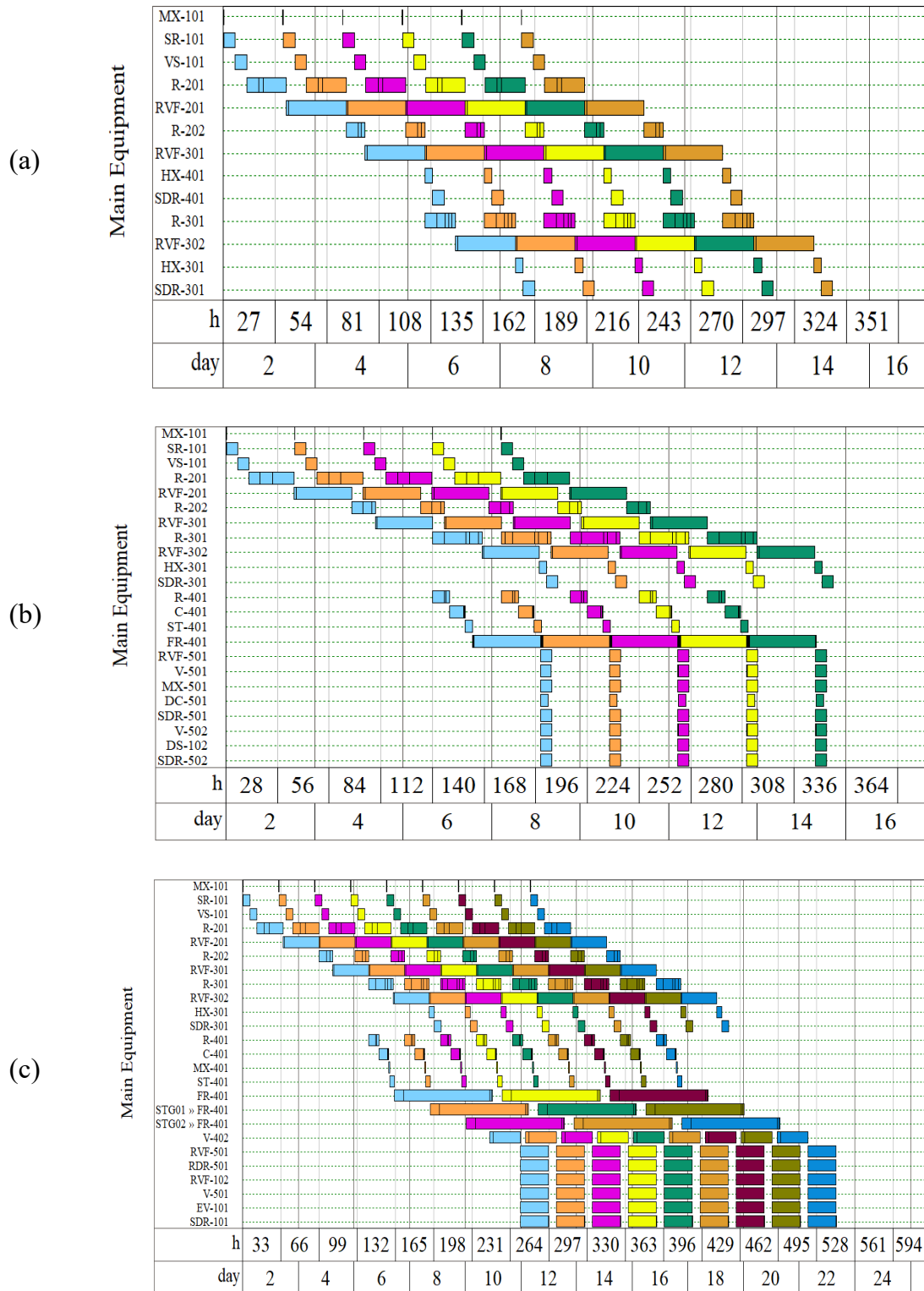


Figura 14.- Diagramas de tiempos de ocupación de los equipos del proceso con múltiples lotes para: (a) el Caso I sin ningún equipo complementario, (b) el Caso II sin ningún equipo adicional y (c) el Caso III con 2 fermentadores adicionales.

Como parte de la **evaluación técnica** se obtuvieron las cantidades anuales y los rendimientos de productos obtenidos respecto a la cantidad de materia prima (Tabla 6). Es importante resaltar que el rendimiento de los biofertilizantes es diferente dado que un gran porcentaje de este depende de los residuos microbianos generados, por lo tanto, a mayor bacterias cultivadas y empleadas en el proceso mayor será la cantidad de biofertilizante obtenido.

Tabla 6.- Resultados obtenidos del análisis económico para el Caso I con tres fermentadores, y para los Casos II y III sin ningún equipo añadido (para una alimentación de 20,000 t/año de sargazo).

Reporte de Rentabilidad					
Concepto	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Unidades
Producción de alginato de sodio	4,205	4,205	4,205	-	t/año
Producción de PHB	-	1,004	-	-	t/año
Producción de ácido láctico	-	-	4,147	-	t/año
Producción de biofertilizante	-	10,383	12,183	-	t/año
Producción de vapor	-	-	-	37,775	t/año
Producción de electricidad	-	-	-	3,325	MW-h/año
Rendimiento de alginato de sodio	0.210	0.210	0.210	-	Kg/Kg*
Rendimiento de PHB	-	0.050	-	-	Kg/Kg*
Rendimiento de ácido láctico	-	-	0.207	-	Kg/Kg*
Rendimiento de biofertilizante	-	0.519	0.609	-	Kg/Kg*
Rendimiento de vapor	-	-	-	1.889	Kg/Kg*
Rendimiento de electricidad	-	-	-	0.166	kW-h/Kg*

* Rendimientos de producto por Kg de sargazo

Para la **evaluación económica** se asumió un costo de adquisición del sargazo de 0.05 USD/kg (Caxiano et al., 2022). Los costos de venta usados para el alginato de sodio (Galindo et al., 2007), PHB (Wang et al., 2024), ácido láctico (Anaya-Reza y López Arenas, 2018) y fertilizante (Caxiano et al., 2022) fueron 20, 5, 1.38, 0.2 USD/kg, respectivamente. Y de acuerdo con la base de datos de SPD, el costo de los servicios correspondiente a agua de enfriamiento, agua fría, agua enfriada, agua refrigerada, vapor y electricidad fueron 0.0125 USD/t, 0.025 USD/t, 0.175 USD/t, 0.28 USD/t, 0.1 USD/KW-h, respectivamente; mientras que el vapor de alta presión generado por el proceso de cogeneración (CASO III) tiene un consto de 0.20 USD/kg.

Para el **análisis técnico-económico** se calcularon el retorno sobre la inversión (RSI, Ec. 2) y el tiempo de retorno de la inversión (TRI, Ec. 3) para poder comparar los rendimientos respecto a la materia prima entrante en los cuatro casos, dando como resultado la Tabla 7.

Tabla 7.- Datos económicos obtenidos al modificar la cantidad de materia prima entrante para los casos de estudio (considerando un costo de 0.05 USD/kg sargazo)

Cantidad de sargazo (t/año)	Caso I		Caso II		Caso III		Caso IV	
	RSI (%)	TRI (años)	RSI (%)	TRI (años)	RSI (%)	TRI (años)	RSI (%)	TRI (años)
4,000	82.27	1.22	15.84	6.31	35.41	2.82	-19.4	NA
8,000	129.45	0.77	31.16	3.21	52.55	1.90	-19.3	NA
12,000	164.26	0.61	39.59	2.53	68.31	1.46	-18.8	NA
16,000	164.82	0.61	44.92	2.23	67.28	1.49	-17.9	NA
20,000	170.71	0.59	50.86	1.97	72.55	1.38	-17.1	NA

*NA = no aplica

A partir de los datos obtenidos, podemos destacar que el Caso IV resulta no ser rentable aun cuando se utilice la cantidad recolectada en todo Quintana Roo; por otro lado, los Casos I y III son rentables con la cantidad recolectada en la zona de Tulum y para el Caso II es necesario contar con el triple de la materia antes mencionada. Cabe recalcar que, para los primeros tres casos mientras mayor sea el sargazo para tratar mayor será la rentabilidad de la planta. La Figura 15 muestra el comportamiento que el retorno sobre la inversión tiene al aumentar la capacidad instalada de la planta para los tres casos rentables, se puede observar que para los Casos I y III el RSI llega a una fase estacionaria cercana a los 12,000 t/año, mientras que para el Caso II se logra apreciar una reducción de la tasa de incremento, esto podría deberse a que está por llegar al límite máximo y posteriormente se reducirá.

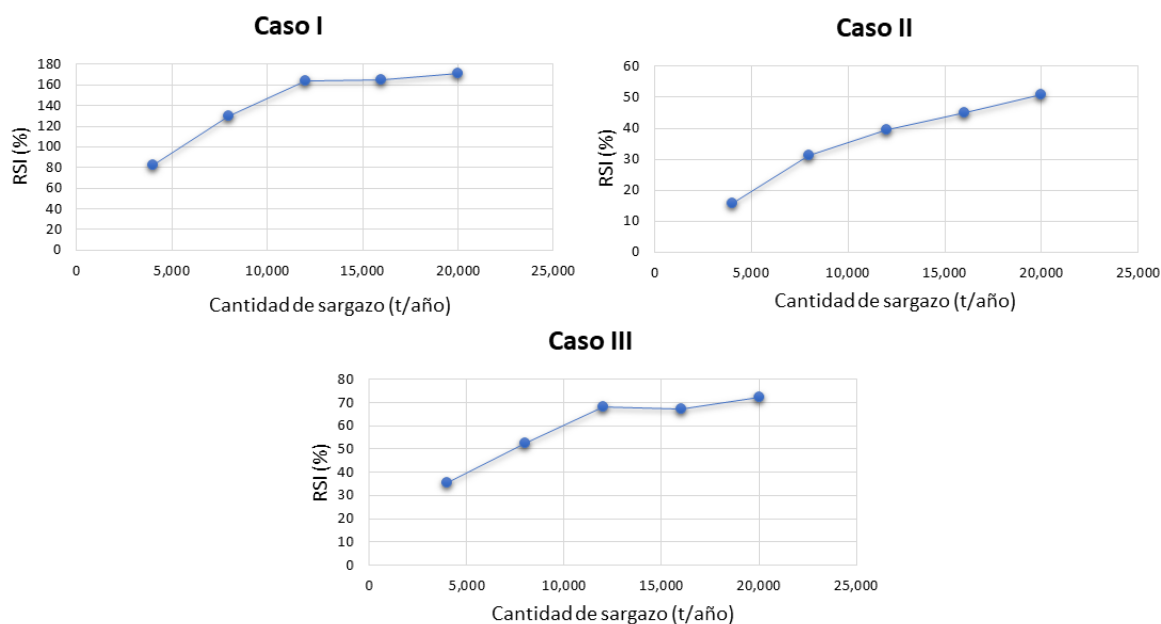


Figura 15.- Comportamiento del RSI al aumentar la cantidad de sargazo tratado para cada uno de los casos de estudio.

Para el *análisis económico* se tomaron en consideración dos grupos de parámetros: los primeros se conocen como Inversión de Capital Total y abarcan a aquellos necesarios para poner en marcha la biorrefinería, entre ellos se encuentran conceptos como el capital fijo directo y el costo de arranque. Mientras que los valores del segundo grupo hacen referencia a los que deben ser tomados en cuenta cada año para el óptimo funcionamiento de la planta y se les conoce como costos de operación anual, entre estos se pueden destacar los costos de los materiales a emplear, el capital de trabajo, el mantenimiento de los equipos, los costos de investigación, los costos de los servicios utilizados y distintos consumibles empleados por los equipos. En la Tabla 8 se presentan los costos de la inversión de capital, al igual que los ingresos de venta unitaria y anuales de los productos generados para los Casos I, II y III con una capacidad instalada de 20,000 t/año. De igual manera, al final de la tabla se muestran los costos totales de operación anuales de los mejores tres casos y en la Figura 16 se observan los porcentajes de los parámetros del grupo dos con respecto al total.

Tabla 8.- Resultados obtenidos del análisis económico para el Caso I con tres fermentadores, y para los Casos II - IV sin ningún equipo añadido (para una alimentación de 20,000 t/año de sargazo).

Reporte de Rentabilidad					
Concepto	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Unidades
Inversión de Capital Total					
Capital fijo directo	28,719,000	73,524,000	52,845,000	1,188,000	USD
Capital de trabajo	616,000	927,000	981,000	106,000	USD
Costos de arranque	1,436,000	3,676,000	2,642,000	34,000	USD
Inversión total	30,772,000	78,127,000	56,469,000	1,328,000	USD
Ingresos					
Ingreso por alginato de sodio	84,108,297	84,108,609	84,113,596	-	USD/año
Ingreso por PHB	-	5,018,636	-	-	USD/año
Ingreso por ácido láctico	-	-	5,723,458	-	USD/año
Ingreso por biofertilizante	-	2,076,661	2,436,519	-	USD/año
Crédito por vapor	-	-	-	755,492	USD/año
Crédito por electricidad	-	-	-	332,506	USD/año
Ingresos totales	84,108,297	91,203,906	92,273,572	1,087,998	USD/año
Costos de producción					
Costo de operación	11,662,000	41,087,000	38,528,000	1,414,000	USD/año

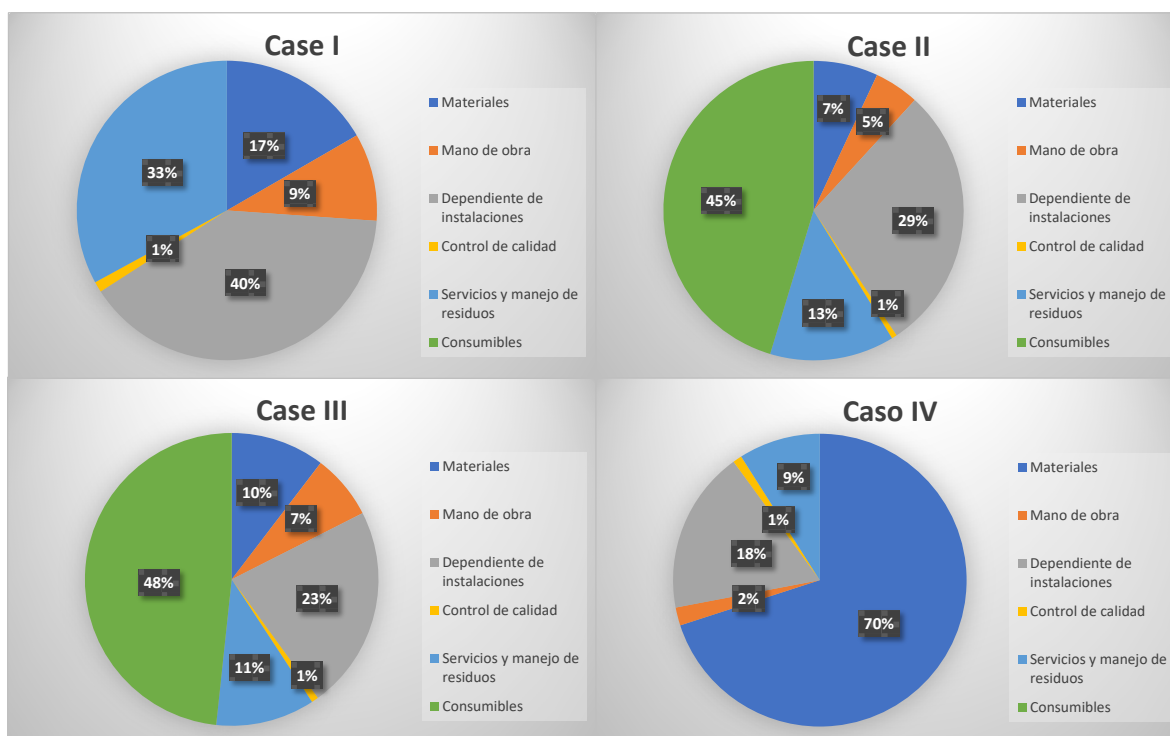


Figura 16.- Distribución de los costos de operación anual para los casos de estudio.

Para el **reporte de impacto ambiental** se consideraron los consumos de (a) agua de proceso empleada para llevar a cabo las reacciones y para mantener una relación de 10% de sólidos en la fase acuosa en los procesos, (b) el vapor empleado para elevar la temperatura de las operaciones unitarias que lo vieran necesario, (c) el agua de enfriamiento (agua de servicio) utilizada para moderar la temperatura de las corrientes de salida y evitar inconvenientes al entrar en otros equipos, (d) la energía eléctrica consumida por los equipos, y en última instancia, (e) el CO₂ generado de manera directa por el proceso. En la Tabla 9 se observan las cantidades estimadas para los casos de estudio.

Tabla 9.- Resultados obtenidos del análisis ambiental comparando los servicios empleados por unidad de sargazo procesado.

Reporte de Impacto Ambiental					
Concepto	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Unidades
Agua de proceso	18.27	25.84	26.93	1.96	kg/kg sargazo
Vapor	2.66	4.58	0.02	NA*	kg/kg sargazo
Agua de enfriamiento	92.75	351.50	119.99	2.29	t/kg sargazo
Energía eléctrica	0.13	1.18	0.42	NA*	MW-h/kg sargazo
CO ₂ generado	0.00	0.07	0.00	0.88	kg/kg sargazo

* No aplica, ya que se genera crédito a partir del proceso de cogeneración

Dado que el *Caso IV* resultó no ser rentable (ver Tabla 7) considerando el costo de adquisición del sargazo de 0.05 USD/kg (Caxiano et al., 2022), entonces se realizó un análisis paramétrico en el cual se le otorgaron distintos valores al costo de adquisición del sargazo. Para ello se consideró los siguientes costos: 0.015 USD/Kg, 0.030 USD/Kg 0.057 USD/Kg (González-Contreras, 2021). Adicionalmente se ha reportado que para realizar la limpieza del sargazo en las playas de Quintana Roo únicamente empleando mano de obra sin maquinaria alguna de 0.069 USD/Kg (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Dentro de la Tabla 10 se puede apreciar que el factor que tiene un mayor efecto en la rentabilidad de la simulación de la planta industrial no es la capacidad instalada de la cantidad de materia prima que se procese, sino el precio al cual se adquiere. Los valores enmarcados en las casillas de color gris muestran los valores positivos, y se empiezan a hacerse notar tras otorgar al sargazo el valor de 0.03 USD/kg y con más de 8,000 toneladas de sargazo procesadas anualmente.

Tabla 10.- Análisis técnico-económico para el Caso IV al variar la cantidad de materia prima y el costo de adquisición del sargazo.

Cantidad de sargazo (t/año)	Costo estimado del sargazo									
	0.07 USD/kg		0.06 USD/kg		0.05 USD/kg		0.030 USD/kg		0.015 USD/kg	
	RSI	TR	RSI	TR	RSI	TR	RSI	TR	RSI	TR
4,000	-28.71	NA	-22.82	NA	-19.35	NA	-9.33	NA	-1.68	NA
8,000	-35.11	NA	-25.19	NA	-19.32	NA	-2.19	NA	10.08	9.92
12,000	-39.65	NA	-26.59	NA	-18.82	NA	4.02	24.89	17.62	5.68
16,000	-42.28	NA	-27.03	NA	-17.94	NA	8.57	11.67	23.34	4.28
20,000	-44.48	NA	-27.36	NA	-17.11	NA	11.58	8.63	28.38	3.52

5. ANÁLISIS DE IMPACTO SOCIAL

Para medir el nivel de afectación por la presencia del sargazo en las playas de la Riviera Maya, tanto a la población local como a los turistas, se decidió realizar una investigación de campo durante los días del 25 al 30 de julio del año 2024 en las playas El Recodo (Playa del Carmen), Cozumel muelle (Isla de Cozumel) y Tulum ruinas (Zona arqueológica de Tulum). En esta actividad se buscó investigar las consecuencias de los arribazones del alga, al igual que contestar una serie de preguntas relacionadas con información general y específica del alga.

Debido a que cada una de las playas tiene su propia morfología se describirá lo observado por separado:

- Playa el Recodo: Al tener un área extensa de arena se pudo observar una acumulación del alga marina en estos lugares (Figura 17), dando lugar a una larga hilera que recorre gran parte de la costa. Del mismo modo, se apreció un color marrón claro en el agua con poca presencia de sargazo y marrón oscuro cuando la cantidad era elevada.

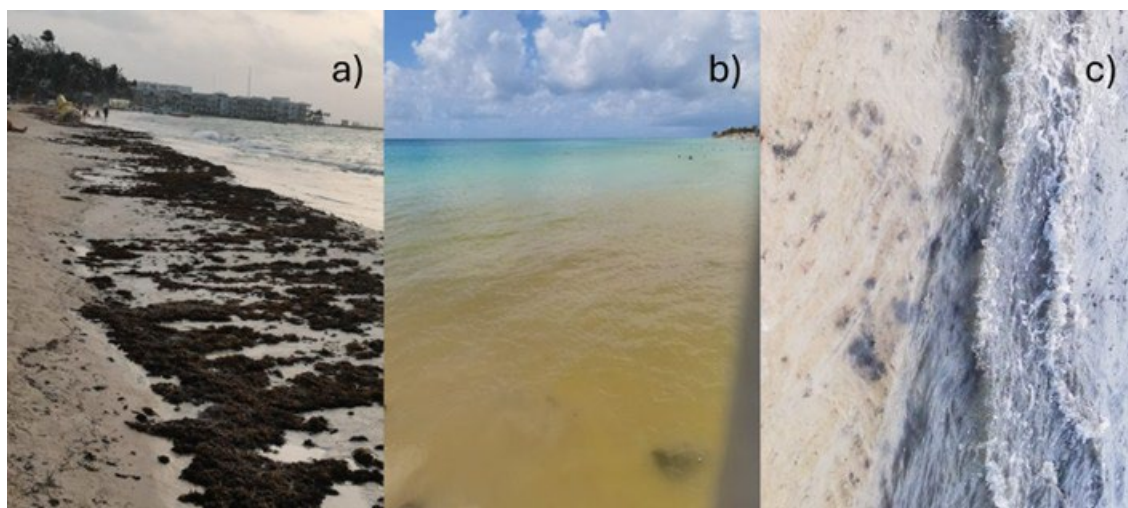


Figura 17.- Imágenes de elaboración propia que muestran al sargazo en la zona: a) supralitoral, b) intermareal a 10 metros de tierra firme, c) intermareal donde termina el mar.

- Cozumel muelle: Debido a que alrededor del muelle se encuentra un malecón, las algas marinas no tienen un gran lugar donde postrarse (a diferencia de Playa del Carmen) por lo que estas se quedan dentro del mar a las orillas del malecón otorgándole un color oscuro (Figura 18).



Figura 18.- Imagen de elaboración propia que muestra el malecón del muelle de Cozumel.

- Tulum ruinas: La zona arqueológica de Tulum se encuentra situada encima de un acantilado, por lo que la playa que colinda con las ruinas no es muy extensa y en algunos puntos no se logra apreciar que exista arena entre las rocas y la orilla del mar (Figura 19). Lo mencionado anteriormente permite que en ciertos puntos nos encontremos sargazo acumulado en las afueras del mar y en otros que este se encuentre dentro o a las orillas del mar.



Figura 19.- Imagen de elaboración propia que muestra: a) el sargazo acumulado en la zona supralitoral, b) la diferencia entre el acantilado y la playa, c) el sargazo acumulado en la zona intermareal cercana a la orilla.

Con respecto a la encuesta, para tener una variedad de respuestas, se les preguntó a personas hispanas y anglófonas que fueran turistas y locales. En el Anexo B se muestran las preguntas realizadas, y la Tabla 11 presenta la distribución de respuestas respecto al idioma, lugar y residencia de las personas.

Tabla 11.- Distribución del número de personas encuestadas.

Número de encuestas					
Idioma		Lugar de la encuesta		Situación en la playa	
Español	48	El Recodo	39	Local	38
Ingles	15	Cozumel	21	Turista	25
		Tulum	3		
Total	63	Total	63	Total	63

De la encuesta realizada se puede rescatar que el 96% de las personas entrevistadas han escuchado acerca del sargazo, 56 de los 63 entrevistados se han encontrado con el alga en la playa o en el mar. Respecto a si consideran su llegada un problema, el 65% de los aplicantes contestaron de manera afirmativa, mientras que el 30% no lo consideraron de esa manera ya que creían que era algo natural. El Anexo B contiene las gráficas de distribución de las preguntas consultadas, del mismo modo, se ahonda con mayor detalle cada una de las respuestas obtenidas.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Durante este trabajo se indagó en algunos de los aspectos importantes que deben tomarse en cuenta para una correcta implementación de una biorrefinería, y con ello evitar problemas que puedan afectar el rendimiento tanto económico como de la generación de productos. Las contribuciones de este trabajo son las siguientes:

- La incorporación de la generación de compuestos inhibitorios que afectan el proceso fermentativo (HMF y furfuraldehído), así como su mecanismo de detoxificación. Como resultado se verificó que la cantidad de compuestos inhibitorios está debajo de las concentraciones reportadas en la literatura, por lo cual, para este caso de estudio el Furfuraldehído y el HMF no inhiben el cultivo celular de PHB y ácido láctico.
- Se implementaron diseños conceptuales para la producción de alginato, PHB y ácido láctico exitosamente. Como resultado para los mejores casos de estudio se lograron:

Caso I: 0.21 ton alginato/ton sargazo, 170.7 % RSI y 0.59 años de TRI.

Caso II: 0.21 ton alginato/ton sargazo, 0.05 ton PHB/ton sargazo, 50.86 % RSI y 1.97 años de TRI.

Caso III: 0.210 ton alginato/ton sargazo, 0.21 ton á. láctico, 72.55 % RSI y 1.38 años de TRI.

Caso IV: 1.89 ton vapor/ton sargazo, 0.17 kW-h/ton sargazo, 28.38 % RSI y 3.52 años de TRI. No obstante, estos resultados se consiguen con un costo tres veces menor de lo reportado; por lo que no se puede considerar una configuración viable realista.

- El impacto social se estudió mediante una encuesta de campo, realizada en las playas de Quintana Roo. Como resultado se logró identificar los usos domésticos, las temporadas de los arribazones y el efecto del sargazo en la salud y el medioambiente.

Perspectivas

La implementación de una biorrefinería para abordar la problemática de los arribazones de sargazo puede traer consigo muchos beneficios, sin embargo, aún es necesario llevar a cabo distintos estudios para entender con mayor profundidad los retos que implicaría poner en marcha una planta de tratamiento industrial para el sargazo como la que se plantea en este proyecto. Algunos aspectos a tener en cuenta son:

- Identificar la configuración ideal dependiendo del objetivo a alcanzar, el cual puede ser el generar la mayor ganancia económica posible o tener un proceso que tenga la meta de tener una generación cero de residuos, entre otros.

- Realizar las evaluaciones económicas variando el costo de adquisición del sargazo relacionado a los costos generados por la recolección tanto a mano, como con maquinaria pesada, e inclusive mediante barcos sargaceros.
- Del mismo modo que el punto anterior, se debe tomar en cuenta los gastos generados por el transporte del alga desde el punto de recolección hasta la biorrefinería.

REFERENCIAS

- Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., Chablé-Villacís, R., Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Canché-Escamilla, G., Caballero-Vázquez, A., Hernández-Zepeda, C., Barredo-Pool, F. A., & Tapia-Tussell, R. (2021). Presence of Polyphenols Complex Aromatic “Lignin” in *Sargassum* spp. from Mexican Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jmse9010006>
- Anaya-Reza, O.; López-Arenas, T. (2018) Diseño de una biorrefinería sostenible para la producción de ácido láctico a partir de melaza de caña de azúcar, *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17 (1), 243-259. <https://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V17/No1/Proc36.html>
- Améndola, M. (2019). Con playas limpias, Tulum espera repunte en ganancias. *La Jornada Maya*. Recuperado 26 de agosto de 2022 de <https://www.lajornadamaya.mx/quintanaroo/180793/con-playas-limpias-tulum-espera-repunte-en-ganancias>
- Améndola, M. (2022). La mayoría de las playas de Quintana Roo reporta arribo «muy bajo» de sargazo. *La Jornada Maya*. Recuperado 26 de agosto de 2022 de <https://www.lajornadamaya.mx/quintanaroo/201681/la-mayoria-de-las-playas-de-quintana-roo-reporta-arribo-muy-bajo-de-sargazo>
- Arteaga, J.E., Cerros, K., Rivera-Becerril, E., Lara, A.R., Le Borgne, S., Sigala, J.C. (2021) Furfural biotransformation in *Acinetobacter baylyi* ADP1 and *Acinetobacter schindleri* ACE. *Biotechnology Letters* 43(5), 1043-1050. <https://doi.org/10.1007/s10529-021-03094-1>
- Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory (2024, 7 junio). Un fenómeno climático extremo en el Atlántico Norte pudo desencadenar la explosión de *Sargassum* hace una década. *Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico*, U.S. Department of Commerce. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.aoml.noaa.gov/es/extreme-climate-event-may-have-kicked-off-sargassum-explosion-a-decade-ago/>

- Báez, E. (2010). Cómo obtener un polímero degradable en el laboratorio: Síntesis de la poli(D,L-lactida) y caracterización por RMN 1 h. *Educación Química* 2, 170-177. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30168-X](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30168-X)
- Barros Motta, L. V., Rodríguez Zorro, S. (2020). Evaluación del potencial del uso de las algas de arribazón conocidas como Sargazo (*Sargassum spp.*) [Tesis de Licenciatura] Fundación Universidad De América, Bogotá. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8195/1/6151485-2020-2-IQ.pdf>
- Bertagnolli, C. Espindola, A. P. Kleinübing, S. J. Tasic, L. da Silva, M. G. (2014). *Sargassum filipendula* alginate from Brazil: Seasonal influence and characteristics, *Carbohydrate Polymers*, 111, 619-623. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.024>
- Caxiano, I.N., Mello, P.A., Alijó, P.H.R., Teixeira, L.V. , Cano, R.F. , Maia, J.G.S.S., Bastos, J.B.V., Pavão, M.S.G. (2022) Continuous design and economic analysis of a *Sargassum muticum* biorefinery process, *Bioresource Technology* 343, 126152. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126152>
- Chávez Vilcahuamán, J. N. Poma Fierro, C. R. (2021). Determinación de la influencia de la concentración del h2so4, tiempo y temperatura en el pretratamiento ácido de los residuos de maíz morado [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional del Centro de Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7318>
- CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), Gobierno de México (2019). Arribazón de sargazo a las costas mexicanas. *SECIHTI*, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://seciht.mx/sargazo/index.php/materiales-de-consulta/18-materiales/99-arribo-de-sargazo-a-las-costas-mexicanas-2#:~:text=El%20sargazo%20acumulado%20en%20la,y%20al%20turismo%20de%20playa>
- Espinosa-Negrín, A. M., López-González, L. M., Casdelo-Gutiérrez, N. L. (2022). Pretratamientos aplicados a biomásas lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Revista Cubana de Química* 34 (1), 87-110. <https://www.redalyc.org/journal/4435/443570155006/html/>
- Espinosa, L. A., Li Ng, J. J. (2020). El riesgo del sargazo para la economía y turismo de Quintana Roo y México. *BBVA Research*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2020/02/Riesgo_Sargazo_Big_Data.pdf

- Espinoza-Negrín, A. M., López González, L. M., & Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). Pretratamiento de biomásas lignocelulósicas: breve revisión de los principales métodos utilizados. *SCielo*, 48(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000300108
- Flores-Mendoza, O., Lopez-Arenas, T. (2023) Conceptual Design of a Biorefinery to Use Brown Seaweed Sargassum, *Computer Aided Chemical Engineering* 52, 2369-2374. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50376-0>
- Fuentes Olivera, A. J. (2015). Influencia de la concentración inicial de azúcares y temperatura de fermentación en el rendimiento de un bioplástico a partir del hidrolizado de granos usados de Cervecería empleando *Pseudomonas aeruginosa*. [Tesis de licenciatura] Universidad Nacional de Trujillo, Perú. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/3d0055c9-bd49-4d5e-972f-242ef905f388>
- Galbe, M., Wallberg, O. (2019) Pretreatment for biorefineries: a review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials. *Biotechnology for Biofuels* 12 (1), 294-320. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1634-1>
- Galindo, E., Peña, C., Núñez, C., Segura, D., Espín, G. (2007) Molecular and bioengineering strategies to improve alginate and polyhydroxyalkanoate production by *Azotobacter vinelandii*. *Microbial Cell Factories* 6, 7. <http://doi.org/10.1186/1475-2859-6-7>
- Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2023). Clausura Mara Lezama y SEMAR Temporada de Sargazo 2023 con resultados positivos en Quintana Roo. En *Coordinación General de Comunicación*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://cgq.qroo.gob.mx/clausura-mara-lezama-y-semar-temporada-de-sargazo-2023-con-resultados-positivos-en-quintana-roo/>
- Gonzales, B. (2019). Tipos de plásticos biodegradables en el mundo del embalaje. *RAJA Blog* | Consejos de Embalaje, Logística y Más. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.rajapack.es/blog-es/tipos-plasticos-biodegradables>
- González-Contreras, M.A. (2021). Intensificación del proceso de producción de etanol lignocelulósico [Tesis de doctorado]. UAM-Cuajimalpa. <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/626>
- Granados, D. M. (2015). Catabolismo de furfurales compuestos aromáticos en *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT 5344. Aislamiento de nuevas cepas asimiladoras de cianuro y sus complejos metálicos [Tesis de Doctorado] Universidad de Extremadura, España. https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/2462/1/TDUEx_2014_Macias_Granados.pdf

- Gupta, G. K., Mondal, M. K. (2020). 15 - Bioenergy generation from agricultural wastes and enrichment of end products, Editors: Kumar, R.P., Gnansounou, E., Raman, J.K., Baskar, G. In *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*, Academic Press, 337-356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00015-6>
- Hangos, K.M., Cameron, I.T. (2001) *Process modelling and model analysis*. London: Academic Press.
- Hernández-Carmona, G., Rodríguez-Montesinos, Y.E., Arvizu-Higuera, D.L., Reyes-Tisnado, R., Murillo-Álvarez, J.I., Muñoz-Ochoa, M. (2012). Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 13(2), 155-168. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n2.015>
- Herrera-Monroy, S. (2015). Sargazo (*Sargassum* spp.) como sustrato agrícola [Tesis de Maestría]. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/3336/Herrera_Monroy_S_MC_Edafologia_2015.pdf;jsessionid=B6A56D480F330A6F8C9145EB21D46514?sequence=1
- INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). México en Cifras: Quintana Roo. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=23#collapse-Resumen>
- Jilani, S.B., Olson, D.G. (2023) Mechanism of furfural toxicity and metabolic strategies to engineer tolerance in microbial strains. *Microbial Cell Factories* 22, 221. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02223-x>
- Kiss, T. (2024). *Revolución Industrial - Resumen, causas y consecuencias*. Concepto. Recuperado el 1º de octubre de 2024 de <https://concepto.de/revolucion-industrial/>
- Kloareg, B., Badis, Y., Cock, J.M., Michel, G. (2021) Role and Evolution of the Extracellular Matrix in the Acquisition of Complex Multicellularity in Eukaryotes: *A Macroalgal Perspective*. *Genes* 12, 1059. <https://doi.org/10.3390/genes12071059>
- Lee, S.Y. (1996). Plastic bacteria? Progress and prospects for polyhydroxyalkanoate production in bacteria. *Trends in Biotechnology* 14(11), 431-438. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(96\)10061-5](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)10061-5)
- Lemos, A. C., Mina, A. (2015). Polihidroxialcanoatos (PHA) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial. En *Informador Técnico*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://doi.org/10.23850/22565035.139>
- López-Sosa, L.B., Alvarado-Flores, J.J., Corral-Huacuz, J.C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R.E., Guevara-Martínez, S.J., Alcaraz-Vera, J.V., Rutiaga-Quiñones, J.G., Zárate-Medina, J., Ávalos-Rodríguez, M.L. (2020) A Prospective

- Study of the Exploitation of Pelagic *Sargassum spp.* as a Solid Biofuel Energy Source. *Applied Science* 10, 8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera Bosques/Madera y Bosques*, 27(2), e2722137. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Miranda, F. (2022). El sargazo, un problema en tierra; cunden los tiraderos clandestinos. *Grupo Milenio*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.milenio.com/politica/sargazo-problema-tierra-cunden-tiraderos-clandestinos>
- Naeco. (2023). Historia del plástico: origen y evolución. *Naeco*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://naeco.com/es/actualidad/historia-del-plastico/>
- Red de Monitoreo del Sargazo de Quintana Roo. (2022, 2023). Mapa y Semáforo del sargazo en la zona norte del estado de Quintana Roo. Recuperado de <https://www.facebook.com/RedSargazo/photos/pb.100079515170112.-2207520000./1065464040991041/?type=3>
- Rodríguez, D., López, V., Alpizar, A. G., Calixto, M. E. (2020). Biopolímeros: de principio a fin. *Biopolímeros*, 107-129. https://www.ecorfan.org/handbooks/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIX/Handbooks_Mujeres_en_la_Ciencia_TIX_9.pdf
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G., Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic *Sargassum* cleanup cost in Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 237, 106542. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106542>
- Salvador, C. (2023). Solo 5 de 80 playas se encuentran libres de sargazo según el monitoreo diario en Quintana Roo. *Infobae*. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.infobae.com/mexico/2023/03/16/solo-5-de-80-playas-se-encuentran-libres-de-sargazo-segun-el-monitoreo-diario-en-quintana-roo/>
- Secretaría de Marina (2020). En 2020 se recolectaron 17,865 tons de sargazo, con el apoyo de los 3 órdenes de Gobierno, Sector Privado y población quintanarroense. *gob.mx*. Recuperado el 26 de agosto de 2022 de <https://www.gob.mx/semar/prensa/marina-informa-que-en-2020-se-recolectaron-17-865-toneladas-de-sargazo-con-el-apoyo-de-los-tres-ordenes-de-gobierno-sector-privado-y-pueblo-quintanarroense>
- Secretaría de Marina. MARINA (2021) informa acciones en el marco de la estrategia para atención al sargazo 2021. *gob.mx*. Recuperado el 26 de agosto de 2022 de <https://www.gob.mx/semar/prensa/marina-informa-acciones-en-el-marco-de-la-estrategia-para-atencion-al-sargazo-2021?idiom=es>

- Secretaria de Marina. (2022, 29 abril). Marina alerta sobre llegada ‘alarmante’ de sargazo a México; se esperan 32 mil toneladas. *El Financiero*. Recuperado el 26 de agosto de 2022 de <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2022/04/29/marina-alerta-sobre-llegada-alarmanete-de-sargazo-a-mexico-se-esperan-32-mil-toneladas/>
- Secretaria de Marina. (2022, 19 julio). Estrategia Nacional para la Atención al Sargazo 2022. *gob.mx*. Recuperado el 17 de septiembre de 2022 de <https://www.gob.mx/semar/articulos/estrategia-para-la-atencion-al-sargazo>
- Suárez-Matallana, G. A., Atahualpa, S. R. S., Riquez, A. L., Zúñiga, U. F. R. (2022). Conceptos de biocatálisis de la lignocelulosa desde un enfoque de ingeniería de procesos y sistemas: Una revisión. *Perfiles*, 1(28), 37-51. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i28.179>
- Suárez-Medina, B. P. S., Lara-Rodríguez, A. R. L., Le Borgne, S., Sigala-Alanis, J. C. S. (2015). Estudio de cepas de acinetobacter como detoxificadores de compuestos inhibidores como los hallados en hidrolizados de biomasa lignocelulósica. *XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. <https://smbb.mx/congresos%20smbb/guadalajara15/PDF/XVI/trabajos/VI/VIC-38.pdf>
- Tejada-Tejada, P., Rodríguez-Rodríguez, Y., Rodríguez de Francisco, L. E., Paíno-Perdomo, O., Boluda, C. J. (2021). Lead, chromium, nickel, copper and zinc levels in *Sargassum* species reached the coasts of Dominican Republic during 2019: A preliminary evaluation for the use of algal biomass as fertilizer and animal feeding. *Tecnología y Ciencias del Agua* 12(3), 124–163. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-03-04>
- Trigo, E. J., Mentaberry, A., Cap, E. J., Zelada, A., Villarreal, F. (2011). El potencial de la bioeconomía y las biorrefinerías en la argentina. *Agroindustria* 1. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/biorrefinerias-doc.pdf>
- Serna, L. Rodríguez, A. Albán, F. (2011). Ácido poliláctico (PLA): propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad* 5(1), 16. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>
- Ulloa, M. I. (2014). Preparación de plásticos a partir de deshechos de fuentes naturales renovables. Centro de investigación en química aplicada. Recuperado de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/398/1/Marcelo%20Israel%20Ulloa%20Perez.pdf>
- United Nations, *Cambio climático* | Naciones Unidas. Recuperado el 1º de abril de 2024 de <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

- Wang, J., Huang, J., Liu, S. (2024) The production, recovery, and valorization of polyhydroxybutyrate (PHB) based on circular bioeconomy, *Biotechnology Advances* 72, 108340, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108340>
- Wooley R.J., Ruth M., Glassner D., Sheehan J., Ibsen K. (1999) Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Technical Report TP-580-26157. <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/26157.pdf>

Anexo A. REPORTE ECONOMICO DETALLADO

CASO I. PRODUCCIÓN DE ALGINATO DE SODIO

1. Resumen Ejecutivo

Inversión de Capital Total	30,772,000 \$
Costos de operación	11,662,000 \$/año
Ingresos	84,108,000 \$/año
Tamaño del lote (Capacidad instalada)	16,491.82 kg AS
Producción anual de alginato de sodio (AS)	4,205,415 kg AS/año
Costo de venta unitario (AS)	20.00 \$/kg AS
Margen bruto	86.13 %
Retorno de la inversión (RSI)	171.71 %
Tiempo de retorno de la inversión (TR)	0.59 años

2. Especificación del Equipo y Costos

Cantidad	Nombre	Descripción	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
1	VS-101	Criba de Vibración	7,000	7,000
		Rendimiento = 13197.03 kg/h		
1	SR-101	Triturador	148,000	148,000
		Rendimiento = 13197.03 kg/h		
2	R-201	Reactor de agitación	476,000	952,000
		Volumen = 404.47 m3		
2	RVF-201	Filtro Rotatorio al Vacío	191,000	382,000
		Área del Filtro= 47.09 m2		
2	RVF-301	Filtro Rotatorio al Vacío	188,000	376,000
		Área del Filtro = 44.86 m2		
2	R-202	Reactor de agitación	466,000	932,000
		Volumen = 390.82 m3		
2	R-301	Reactor de agitación	476,000	952,000
		Volumen = 404.20 m3		
2	RVF-302	Filtro Rotatorio al Vacío	192,000	384,000
		Área del Filtro = 47.54 m2		
1	SDR-301	Secador por aspersión	204,000	204,000
		Volumen del secador = 7.85 m3		
1	HX-301	Intercambiador de Calor	18,000	18,000
		Área de intercambio de Calor = 3.11		
1	SDR-401	Secador por aspersión	267,000	267,000
		Volumen del secador = 34.90 m3		
1	HX-401	Intercambiador de Calor	41,000	41,000
		Área de intercambio de Calor =		
		Equipo no listado		845,000
			TOTAL	5,508,000

3. Resumen del Capital Fijo

3A. Costo Directo total de la Planta (CDTP)

1. Costo de compra del equipo	5,508,000
2. Instalación	2,187,000
3. Tuberías	1,800,000
4. Instrumentación	1,690,000
5. Aislamiento	165,000
6. Electricidad	551,000
7. Edificios	1,838,000
8. Patio	826,000
9. Instalaciones auxiliares	1,434,000
CDTP	15,998,000

3B. Costo Indirecto Total de la Planta (CITP)

10. Ingeniería	3,688,000
11. Construcción	5,288,000
CITP	8,975,000

3C. Costo Total de la Planta (CTP = CDTP + CITP)

CTP	24,973,000
------------	-------------------

3D. Tarifas de Contratistas y Contingencia (TCC)

12. Tarifas de Contratistas	1,249,000
13. Contingencia	2,497,000
TCC	3,746,000

3E. Capital Fijo Directo (CFD = CTP + TCC)

CFD	28,719,000
------------	-------------------

4. Costo de Trabajo

Tipo de Trabajo	Costo Unitario	Monto Anual	Costo Anual (\$)	%
Operadores 1	22.80	46,821	1,067,523	96.74
Operadores 2	27.60	1,275	35,190	3.19
Operadores 3	2.07	383	792	0.07
TOTAL		48,479	1,103,505	100.00

5. Costo de Materiales

Material	Costo Unitario	Monto Anual		Costo Anual (\$)	%
Aire	0.000	32,707,184	kg	0	0.00
HCl (26%)	0.027	4,597,140	kg	122,928	6.33
Na ₂ CO ₃	0.200	2,250,630	kg	450,126	23.19
Sargazo	0.050	19,999,905	kg	999,995	51.52
Agua de proceso	0.001	367,959,837	kg	367,960	18.96
TOTAL				1,941,009	100.00

6. Costo de Tratamiento/Disposición de los Residuos

Categoría del Residuo	Costo Unitario	Monto Anual		Costo Anual (\$)	%
Residuos sólidos	0.200	14,582,679	kg	2,916,536	100.00
TOTAL				2,916,536	100.00

7. Costos de Servicios

Servicio	Costo Unitario (\$)	Monto Anual	Unidades	Costo Anual (\$)	%
Energía eléctrica	0.100	2,563,130	kW-h	256,313	27.65
Agua refrigerada	0.175	163,067	MT	28,537	3.08
Agua de enfriamiento	0.025	1,704,327	MT	42,608	4.60
Vapor	0.012	49,962,559	kg	599,551	64.68
TOTAL				927,009	100.00

8. Costo de Operación Anual

Costo	\$	%
Materia Prima	1,941,000	16.64
Dependiente de Trabajo	1,104,000	9.46
Dependiente de Instalación	4,640,000	39.79
Laboratorio	134,000	1.15
Tratamiento/Disposición de Residuos	2,917,000	25.01
Servicios	927,000	7.95
TOTAL	11,662,000	100.00

9. Análisis de Rentabilidad

A. Capital Fijo Directo	28,719,000 \$
B. Capital de Trabajo	616,000 \$
C. Costos de Arranque	1,436,000 \$
Inversión Total (A+B+C)	30,772,000 \$

Producción anual

Alginato de sodio	4,205,415 kg Alginato de sodio/año
-------------------	------------------------------------

Ingresos unitarios

Costo de venta del Alginato de sodio	20.00 \$/kg Alginato de sodio
--------------------------------------	-------------------------------

Ingresos anuales

Venta de la producción de Alginato de sodio	84,108,297 \$/año
Ingresos totales	84,108,297 \$/año

Costo de Operación Anual

Total de costo anual de operación	11,662,000 \$/año
--	--------------------------

Ganancias

Ganancia bruta	72,446,297 \$/año
Impuestos (30%)	21,733,889 \$/año
Ganancia neta (Ganancia bruta – impuestos + depreciación)	52,627,008 \$/año

Retorno sobre la inversión (RSI)	171.71 %
Tiempo de retorno de la inversión (TRI)	0.59 años

Anexo B. REPORTE TÉCNICO DETALLADO

CASO I. PRODUCCIÓN DE ALGINATO DE SODIO

1. DATOS GENERALES DEL PROCESO

Tiempo de operación anual	336	días
Tasa de Ref. de producción unitaria	4,205,414.87	kg alginato de sodio/año
Capacidad instalada	16,491.82	kg alginato de sodio
Tiempo de duración del lote	175.38	h
Tiempo de duración de ciclo	31.00	h
Número de lotes por año	255	

2. MATERIA PRIMA

Materia	Cantidad (kg/año)	Cantidad (kg/lote)
Aire	32,707,184	128,263
Ácido clorhídrico	4,597,140	18,028
Sargazo	19,999,905	78,431
Carbonato de sodio	2,250,630	8,826
Aqua	367.959.837	1.442.980
TOTAL	427,514,696	1,676,528

3. BALANCE GENERAL DE COMPONENTES

COMPONENTES	Entrada (kg/yr)	Salida (kg/yr)
Cenizas	14,900	14,900
Cloruro de calcio	0	1,281,490
Alginato de calcio	4,599,978	688
Dióxido de carbono	0	0
Celulosa	2.229.989	2.085.040
Galactano	537.997	134.499
Galactosa	0	448.335
Glucosa	0	161.056
Ácido clorhídrico	1.195.256	0
Hemicelulosa	327.998	82.000
Lianina	1.919.991	1.919.991
Manano	483.998	120.999
Manosa	0	403.335
Nitroaeno	25.090.265	25.090.265
Otros sólidos	9.885.053	9.885.053
Oxidaeno	7.616.918	7.616.918

Alcinato de sodio	0	4.205.415
Carbonato de sodio	2.250.630	674
Cloruro de sodio	0	1.240.609
Aqua	371.361.721	371.609.334
Xilosa	0	279.545
TOTAL	427.514.696	426.580.146

4. ESPECIFICACIONES DEL FLUJO DEL PROCESO

Fuente	SR-101	VS-101	VS-101	R-201
Destino	VS-101	MX-101	R-201	RVF-201
Temperatura (°C)	1.01	1.01	25.00	30.00
Presión (bar)	4.491.42	4.718.53	1.01	10.26
Tasa de fluio total (kg/batch)	79.182.159	751.159	78.431.000	790.663.051
Componentes de los flujos (kg/batch)				
Ácido alainico	0.000	0.000	0.000	14.661.981
Alcinato de calcio	18.221.343	182.213	18.039.130	2.699
Cloruro de calcio	0.000	0.000	0.000	5.025.450
Celulosa	8.833.390	88.334	8.745.056	8.176.628
Galactano	2.109.794	0.000	2.109.794	527.448
Galactosa	0.000	0.000	0.000	1.758.176
Glucosa	0.000	0.000	0.000	631.592
Metales pesados	58.431	0.000	58.431	58.431
Hemicelulosa	1.299.261	12.993	1.286.268	321.567
Lianina	7.605.430	76.054	7.529.376	7.529.376
Manano	1.898.030	0.000	1.898.030	474.508
Manosa	0.000	0.000	0.000	1.581.705
Otros sólidos	39.156.479	391.565	38.764.914	38.764.914
Aqua	0.000	0.000	0.000	710.052.322
Xilosa	0.000	0.000	0.000	1.096.255

Fuente	RVF-201	RVF-201	R-202	RVF-301
Destino	R-202	Salida	RVF-301	HX-401
Temperatura (°C)	29.99	29.99	80.00	76.97
Presión (bar)	1.01	1.01	27.64	1.01
Tasa de fluio total (kg/batch)	77.209.997	714.453.054	759.927.924	30.936
Componentes de los flujos (kg/batch)				
Ácido alainico	14.661.981	0.000	0.000	78.127.847
Alcinato de calcio	0.025	2.674	0.025	0.000
Cloruro de calcio	46.624	4.978.826	46.624	0.000
Celulosa	8.176.628	0.000	8.176.628	8.176.628
Galactano	4.893	522.555	4.893	4.893
Galactosa	16.312	1.741.864	16.312	0.000
Glucosa	5.860	625.733	5.860	0.000
Metales pesados	58.431	0.000	58.431	58.431
Hemicelulosa	321.567	0.000	321.567	321.567
Lianina	7.529.376	0.000	7.529.376	7.529.376
Manano	4.402	470.105	4.402	4.402
Manosa	14.675	1.567.030	14.675	0.000
Alcinato de sodio	0.000	0.000	16.491.823	0.000

Carbonato de sodio	0.000	0.000	1.211	0.000
Otros sólidos	38.764.914	0.000	38.764.914	38.764.914
Aqua	7.594.138	703.458.184	688.481.012	23.267.635
Xilosa	10.171	1.086.084	10.171	0.000

Fuente	RVF-301	R-301	RVF-302	RVF-302
Destino	R-301	RVF-302	HX-301	Salida
Temperatura (°C)	76.97	80.00	79.04	79.04
Presión (bar)	1.01	27.10	1.01	1.01
Tasa de fluio total (kg/batch)	723.805.03	739.063.155	23.559.562	728.459.389
Componentes de los flujos (kg/batch)				
Alcinato de calcio	0.025	0.025	0.000	0.025
Cloruro de calcio	46.624	46.624	0.000	46.624
Galactano	0.000	16.312	0.000	0.000
Galactosa	16.312	5.860	0.000	16.312
Glucosa	5.860	0.000	0.000	5.860
Manosa	14.675	14.675	0.000	14.675
Alcinato de sodio	16.491.823	16.491.823	16.491.823	0.000
Carbonato de sodio	1.211	2.642	0.000	2.642
Cloruro de sodio	0.000	4.865.134	0.000	0.000
Otros sólidos	0.000	0.000	0.000	4.865.134
Aqua	707.218.33	717.609.890	7.067.739	723.497.948
Xilosa	10.171	10.171	0.000	10.171

Fuente	HX-301	SDR-301
Destino	SDR-301	Salida
Temperatura (°C)	30.00	70.00
Presión (bar)	1.01	1.01
Tasa de fluio total (kg/batch)	23.559.562	18.847.741
Componentes de los flujos (kg/batch)		
Alcinato de sodio	16.491.823	16.491.823
Aqua	7.067.739	2.355.918

Anexo C. ENCUESTA REALIZADA EN LA INVESTIGACIÓN DE CAMPO EN PERSONA

Las preguntas evaluadas, la cantidad de personas y sus respectivas respuestas para verificar el impacto social que tienen los arribazones del sargazo en las costas de Quintana Roo se muestran a continuación:

1.- ¿En qué rango de edad se encuentra?

15-24	25-39	40-64	65<
8	28	24	3

2.- ¿Ha escuchado o conoce acerca del sargazo?

Si	No
61	2

3.- ¿Se ha encontrado con sargazo en la playa o en el mar?

Si	No
56	7

4.- ¿Cree que el sargazo sea un problema?

Si	No	No aplica
41	19	3

5.- ¿Ha estado en contacto con sargazo (en el mar o playa)?

Si	No
49	14

6.- ¿Sintió algún picor al entrar en contacto con el sargazo?

Si	No	No aplica
34	14	15

7.- ¿Percibió algún olor al entrar en contacto con el sargazo?

Si	No	No aplica
42	18	5

8.- ¿Considera que se está haciendo lo suficiente en lo que concierne a la limpieza de las playas con sargazo?

Si	No	No aplica
28	26	9

9.- ¿Ha visto que alguna organización se haga responsable de limpiar las playas del sargazo?

Si	No	No aplica
38	18	7

10.- ¿Cómo se hizo la recolección?

A mano	Con maquinaria	Ambos	No aplica
15	11	20	17

11.- ¿Sabe a dónde se llevan el sargazo recolectado?

Si	No	No aplica
10	37	16

12.- ¿Conoce algún producto elaborado a partir de sargazo?

Si	No	No aplica
14	37	12

13.- ¿Ha comprado algún producto elaborado a base de sargazo?

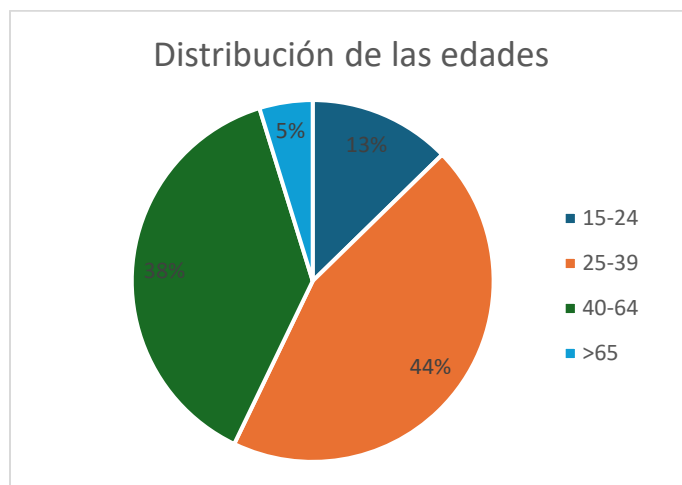
Si	No	No aplica
0	39	24

14.- ¿Considera que el precio de estos productos es elevado?

Si	No	No aplica
0	0	63

DISTRIBUCIONES DE LAS RESPUESTAS DE LA ENCUESTA

Se reportó que de las encuestas realizadas los dos rangos de edad que más predominaron fueron de 25 a 39 y de 40 a 64 con un 38.1% y un 44.44%. Por lo que se esperaba que tuvieran un mayor nivel informativo sobre la situación del sargazo en el estado de Quintana Roo.



Posteriormente se verificó si por lo menos había escuchado acerca de esta alga, en donde el 96.8% de los encuestados dieron una respuesta afirmativa y únicamente 2 personas no tenían conocimiento alguno sobre este. Cabe enfatizar que aquellas personas que no sabían que era el sargazo eran turistas extranjeros.



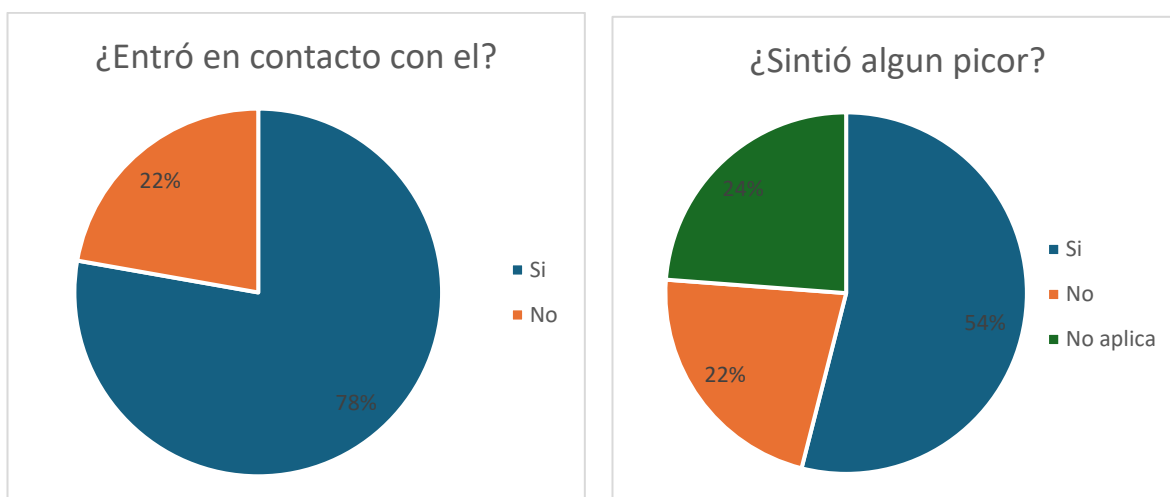
Dado que varias personas nativas del estado no pasaban la mayor parte del tiempo cerca de la playa por motivos de trabajo y que algunos turistas aún no visitaban el mar se preguntó si se habían topado con el alga en tierra o en el mar; obteniendo una respuesta positiva por parte del 89% de los encuestados.



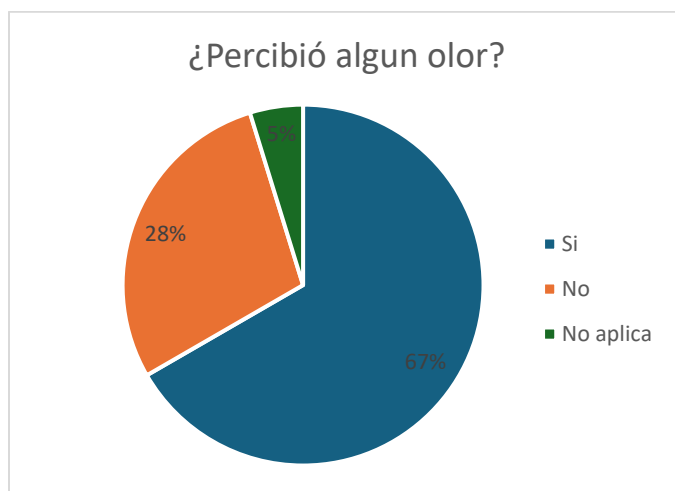
Quizás la pregunta más importante fue para saber si veían la llegada del sargazo como un problema, a lo cual la mayoría respondió que afirmativamente. No obstante, las 19 personas que no creen que es un problema es porque se han acostumbrado a que cada año aparezca y lo ven como algo normal por parte de la naturaleza.



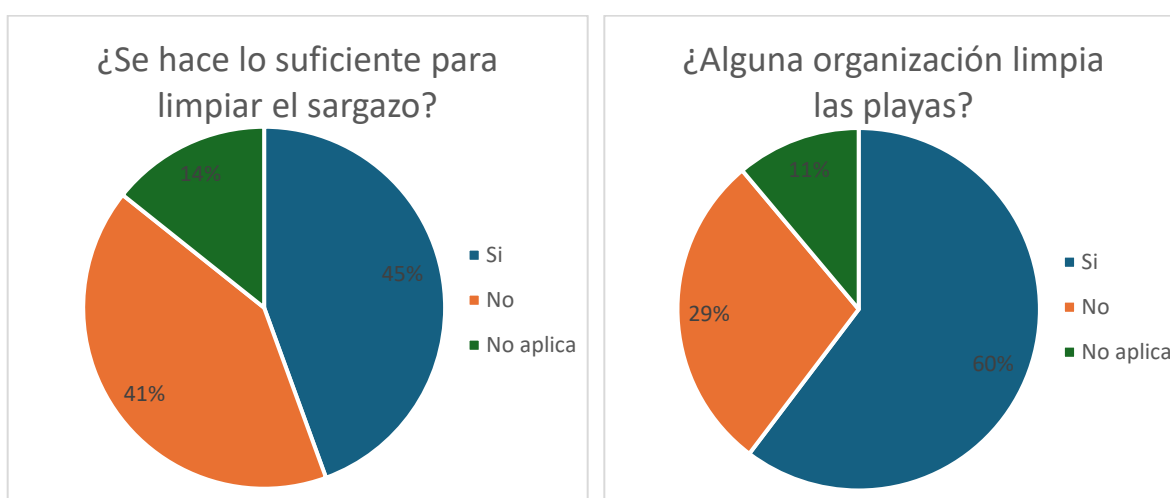
Para poder saber si el contacto con el sargazo generó una reacción adversa en la piel, primero se tuvo que establecer la cantidad de personas que habían tenido contacto con el alga. Dando como resultado que de 49 personas que lo tocaron, solamente 34 de ellas sintieron algún efecto de esa acción, esto puede ser debido a que la sensibilidad cutánea no es la misma en todas las personas y a que algunas son más propensas a verse afectadas por distintos elementos como la arena, el sol o el agua salada.



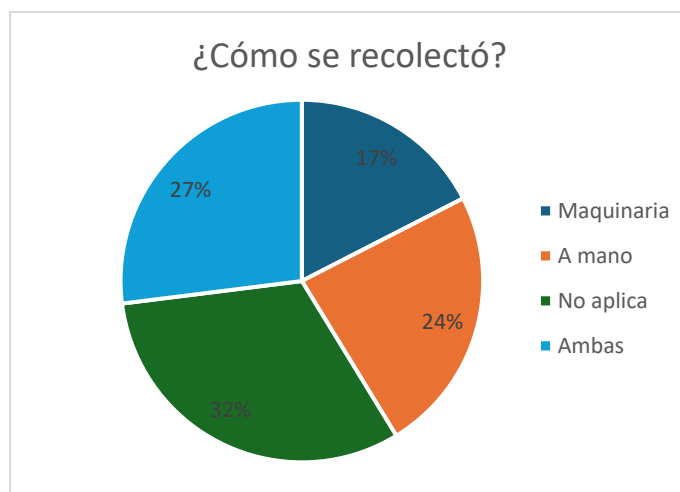
En varios informes se reporta que los cúmulos de sargazo producen un olor fétido al descomponerse y al preguntar por su experiencia a las personas encuestadas, únicamente 18 de 63 mencionaron que no les llegaba ningún olor en particular al estar cerca del alga. Esto puede ser por la poca cantidad de sargazo acumulado en comparación a otras épocas del año y también debido a la sensibilidad de este sentido entre cada persona, cabe señalar que de entre quienes dieron una respuesta negativa se encontraban varios turistas.



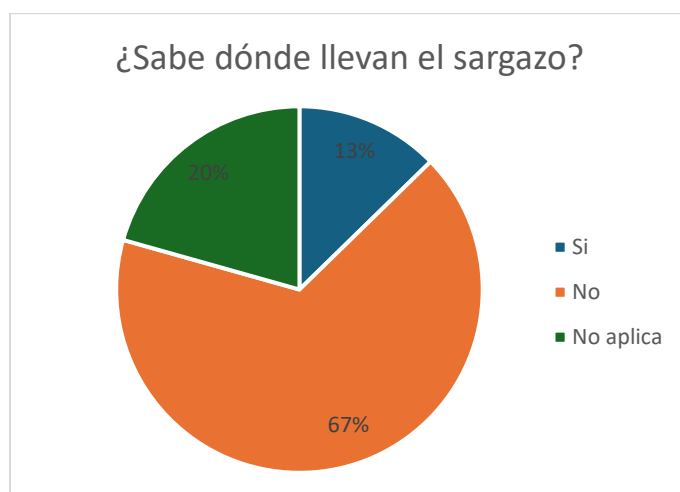
Según distintas fuentes de información existen diversas organizaciones, principalmente el gobierno y los hoteles, que se encargan de realizar la limpieza de las playas que tengan presencia de sargazo. Durante la realización de las preguntas, 28 personas mencionaron que si era notable la labor que realizaban para mantener las playas despejadas en su gran mayoría, sin embargo, 26 de los encuestados comentaron que debía reforzarse la campaña de limpieza dado que todos los días se podía encontrar el alga a las orillas del mar y dentro de este. De aquellos que contestaron de forma negativa a la pregunta, únicamente 18 de ellos dijeron que no les constaba que alguna organización fuera la responsable de esta tarea; esto puede deberse a que especificamos como organizaciones el gobierno y los hoteles, mientras que mencionaban que comúnmente eran voluntarios de la misma comunidad quienes realizaban ese trabajo.



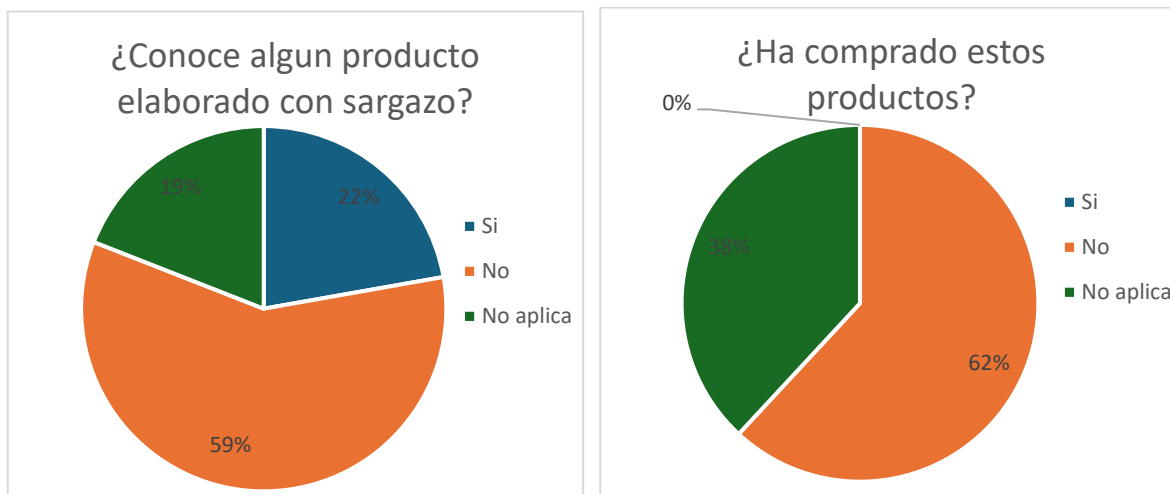
Al preguntar a la gente el metodo de recolección, 20 de las 63 personas encuestadas no fueron capaces de responder a la pregunta, posiblemente porque en las playas del Puerto de Cozumel no se realiza esa actividad al no tener una gran porcion de arena cerca del malecon y a que no mucha gente entra al agua por los barcos. De las otras formas de recolección la más alta fue con maquinaria y a mano (ambas) debido a que cerca del puerto que envía el Ferry a Cozumel existe un área extensa en donde es posible manejar este tipo de vehiculos. En tercera posición se encontró la limpieza a mano ya que otras playas que se visitaron tenian el terreno irregaular y rocoso y el acceso era más complicado; finalmente era poco común encontrar maquinaria de recolección por su cuenta, ya que con freuencia los trabajadores sacaban el sargazo de las proximidades del mar para que los equipos de recolección los transportaran lejos de la playa.



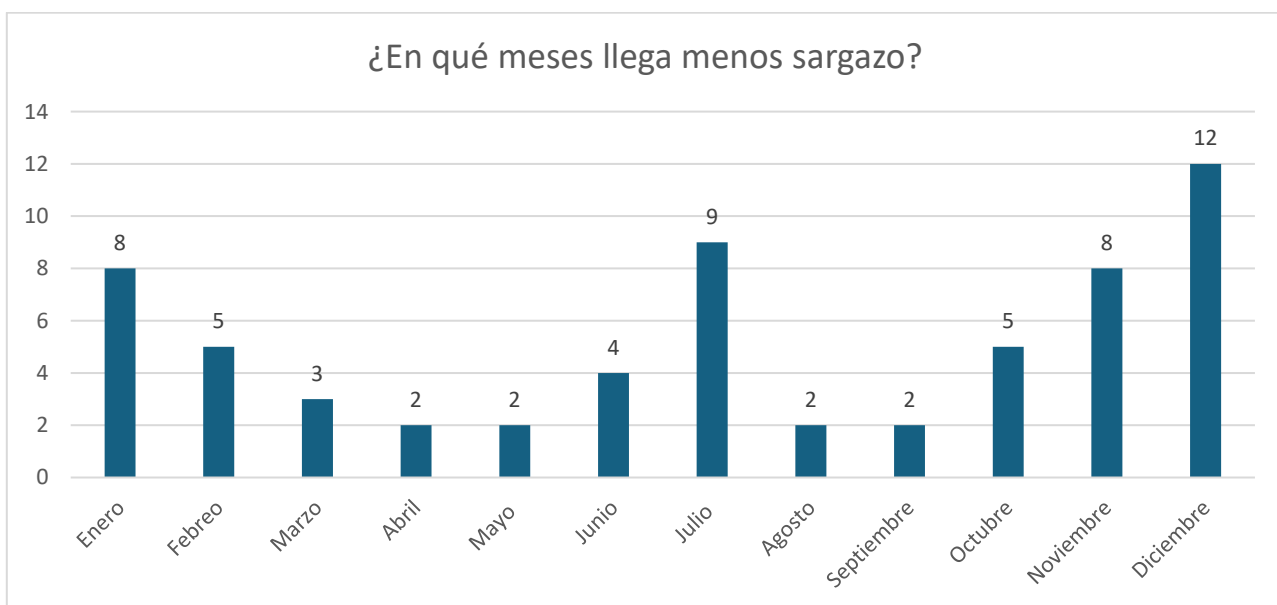
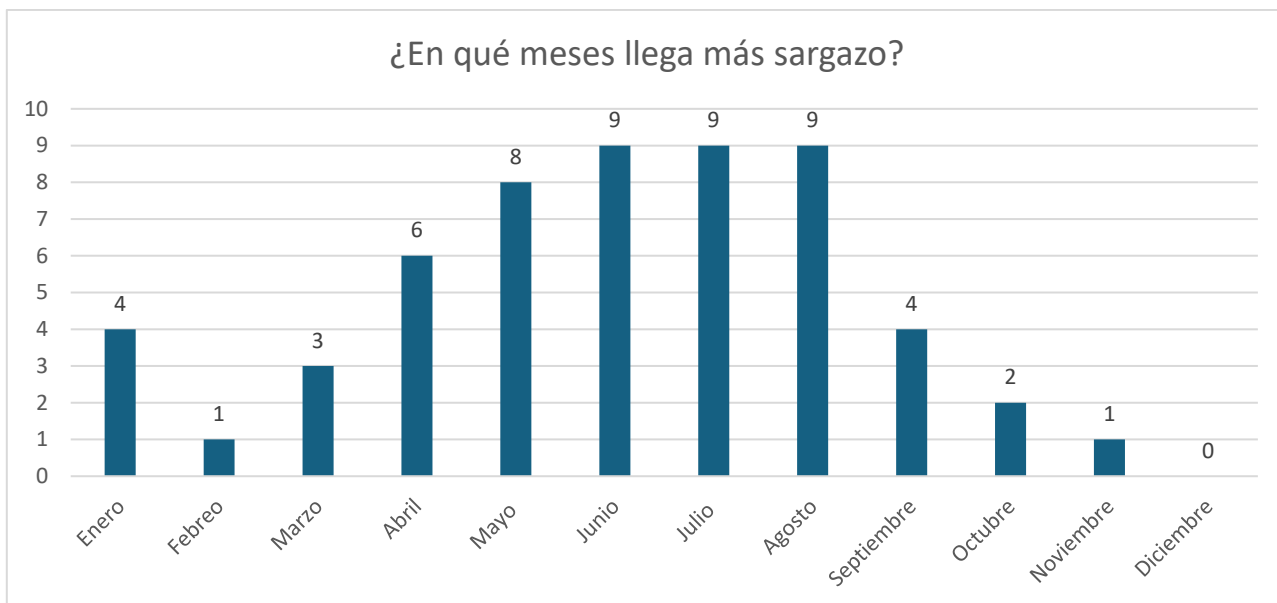
Uno de los problemas que trajo los arribazones masivos de sargazo fue la creación de tiraderos clandestinos y su posterior contaminación del área colindante, por lo que el saber a dónde se llevan el material es crucial para evitar malos manejos. De las 63 personas a las que se les pregunto, 10 de ellas tenían una idea de en dónde recopilaban el alga, algunas de sus respuestas fueron: a los ejidales de Lázaro Cárdenas del Rio, hacia Puerto Morelos, en centros de acopio especiales y a basureros.



Un aspecto importante que tomamos en cuenta es la visibilidad que se le da a lo que se hace con el sargazo, por ende, el analizar si se tenía el conocimiento de algún producto elaborado a partir del alga y si en algún momento había comprado alguno para compararlo con alguno similar era uno de nuestros objetivos. De las personas encuestadas, 14 dijeron que habían escuchado de objetos como: bloques de construcción, folders, suelas de zapatos, composta, fibras y también que se empleaban como relleno. No obstante, ninguno poseía información referente al precio de estos materiales.



Al preguntar en que meses llegaba la mayor y la menor cantidad de sargazo, se buscó que dieran más de una respuesta para que fuese notoria la disminución respecto a cada uno de los meses. Se puede observar que las personas empiezan a ver un incremento del alga en el mes de abril, a su vez eso explicaría el impacto al turismo pues se tiene lugar la festividad de “Semana Santa”; y no informan de un descenso hasta septiembre, por lo que la temporada vacacional (de julio a agosto) también se ve afectada con la acumulación en grandes cantidades de sargazo. Por otro lado, a principios y a finales del año es cuando se reportaba la menor cantidad de sargazo, esto puede ser resultado de las bajas temperaturas; sin embargo, julio también aplica a uno de los meses en la que llega muy poco y puede deberse a la temporada de huracanes ya que justo antes de que llegáramos a Quintana Roo un huracán pasó por el estado y el semáforo se mostraba bastante despejado.



Anexo D. PRODUCTOS CIENTÍFICOS GENERADOS

Durante el tiempo de desarrollo este proyecto de especialización se tuvo presencia en diversas actividades académicas las cuales se listan a continuación:

ESTANCIAS TÉCNICO-ACADÉMICAS

- Estancia en la Universidad de Guanajuato: El objetivo fue visitar las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Química para conocer los laboratorios y plantas piloto, y desarrollar experimentos relacionados con la conversión de biomásas lignocelulósicas. Lugar: Universidad de Guanajuato, Guanajuato. Período: 14-18 de octubre de 2024.
- Estancia en la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY): El objetivo fue visitar las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas, asistencia a conferencias y seminarios, y participar en visitas industriales. Lugar: UADY, Mérida, Yucatán. Período: 7-11 de octubre de 2024.

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

- Flores-Mendoza, O., López-Arenas, T, Diseño conceptual de una planta cogeneradora de bioenergía a partir de sargazo, XLVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ (Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química), San José del Cabo, Baja California Sur (13-16 de mayo de 2025). Aceptado. Modalidad: cartel.
- Flores-Mendoza, O., López-Arenas, T, Diseño y simulación de una biorrefinería empleando sargazo como materia prima, Simposio de las licenciaturas y del posgrado de CNI, noviembre 27-29, 2024. UAM- Cuajimalpa (modalidad oral).
- Gómez Roa, M.F., Flores Mendoza, O., López Arenas, T., Simulación de una planta industrial para la producción de PHB (polihidroxibutirato) a partir de posos de café, 6ª Semana de Ingeniería Biológica, UAM-Cuajimalpa, CDMX (6-8 noviembre 2024). Modalidad: Cartel.
- Gómez Roa, M.F., Flores Mendoza, O., López Arenas, T., Simulación de una planta industrial para la producción de PHB (polihidroxibutirato) a partir de posos de café, 2do Congreso de Ciencias Exactas e Ingenierías (ConCEI-2), Universidad Autónoma de Yucatán (9-11 de octubre de 2024). Modalidad: cartel.
- Lopez-Arenas, T., Ureña-Quintana, J., Rivera-Dimas, R., Gomez-Roa, F., Lazaro-Molina, B., Samano-Palacios, K., Flores-Mendoza, O., Conceptual design of a biorefinery for the valorization of spent coffee ground, World Congress on Recycling and Waste Management, Paris, France (August 19-20 , 2024). Poster presentation.

PARTICIPACIÓN EN EVENTO DE DIVULGACIÓN

- Tallerista en la actividad “Valorización de los residuos de café gastado”. Evento de divulgación: Día y Noche Iberoamericana de Investigador@s (colaboración entre la Universidad Autónoma Metropolitana y la Organización de Estados Iberoamericanos). Lugar: UAM-Cuajimalpa CDMX (Septiembre 28, 2024).

ARTÍCULO CIENTÍFICO

- Flores-Mendoza, O., López-Arenas, T., Simulation and Evaluation of Processing Technologies for the Valorization of Sargassum, submitted to Processes (ISSN: 2227-9717) in May 2025. Processes is an international peer-reviewed journal, indexed in Scopus and JCR.

ASESORÍA DE PROYECTO TERMINAL

- María Fernanda Gómez Roa. Producción de PHB a partir de los residuos de café gastado. Lic. en ingeniería biológica. UAM-Cuajimalpa. Período: marzo-octubre 2024. Directora: Dra. Teresa López Arenas, Asesor: Omar Flores Mendoza.