

Desarrollo de un prototipo de empaques a base de celulosa de sargazo

Emigdio Quijano, Diana Giselle

2024

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/6003>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

Desarrollo de un prototipo de empaques a base de celulosa de sargazo

Emigdio Quijano Diana Giselle (octavo semestre en Ingeniería Industrial)^{1, *}, García Muñoz Gabriela (octavo semestre en Ingeniería Industrial)¹, Ramagnoli Fernández Jean André (octavo semestre en Ingeniería Industrial y de Sistemas)¹, Ruiz Ramírez Karla Christell (octavo semestre en Ingeniería de Negocios)¹, Morúa Álvarez Nora del Rocío (profesor responsable)¹, Romero de la Vega Gregorio (profesor asesor)¹.

¹Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

Resumen

Las playas del Caribe en Quintana Roo, en donde se encuentran Cancún, Playa del Carmen, la Riviera Maya, Cozumel y Tulum, constituyen uno de los destinos turísticos de playa preferidos en México para turistas nacionales e internacionales. Entre 2018 y 2019 llegaron miles de toneladas de sargazo a las costas de Quintana Roo. Esta macroalga flotante, principalmente compuesta por las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, sirve como hábitat para animales marinos, fertiliza las dunas de arena y protege la estabilidad de las costas; además de sus varios usos industriales como producto del mar. Sin embargo, si el sargazo no se maneja apropiadamente, su descomposición genera gases de ácido sulfhídrico (H₂S) y de metano (CH₄), e incrementa la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) los cuales afectan la salud humana, la calidad del aire y la composición bioquímica del ecosistema costero. Para intentar combatir este problema ambiental y de manejo de residuos, se propuso un prototipo de empaque a base de celulosa de sargazo, teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas de esta alga, comparando distintos procedimientos de extracción de celulosa, desarrollando un proceso de acuerdo a las normativas nacionales, y determinando factibilidad económica del proyecto una vez modelado el prototipo. Como resultado, obtuvimos una hoja de papel a base de celulosa de sargazo y otros componentes que fue moldeada para convertirse en un empaque, concluyendo así que sí es posible procesar el sargazo químicamente para obtener celulosa y convertirlo en un producto de valor, ayudando a la disposición final de este residuo.

Palabras clave: Celulosa de sargazo, hidrólisis, papel, empaque.

*Autor Corresponsal: diana.emigdio@iberopuebla.mx

Introducción

El sargazo o *Sargassum spp.* es una macroalga flotante que forma colonias que llegan a cubrir grandes extensiones y que se mueven de acuerdo con las corrientes oceánicas. Flotan en masa en el mar, se desplazan en aguas someras y acaban en las playas. Cuando hay crecimiento excesivo arriban a lugares donde normalmente no existían y pueden causar inconvenientes diversos [1]. Al acumularse en las playas, el sargazo se descompone, generando numerosos problemas medioambientales, económicos y sociales. Los más perceptibles tienen que ver con nuestros sentidos: las algas empiezan a oler mal al descomponerse, y cambian el color del paisaje. Al cubrir las aguas costeras, impiden que la luz se filtre al fondo marino, de forma que los corales y otras algas no consiguen realizar la fotosíntesis. Además, cuando el sargazo se descompone consume grandes cantidades de oxígeno, causando anoxia y a su vez emitiendo gases tóxicos (como el ácido sulfhídrico y el metano) [2]. Todo esto afecta a la biodiversidad y genera una cadena de consecuencias que influyen en la supervivencia de numerosas especies.

Se ha estimado que, por su tipo de crecimiento, el sargazo puede duplicar su volumen en menos de 20 días, lo que explica la rápida proliferación de estas mareas doradas. Dado su crecimiento abundante en las costas de varias regiones tropicales y subtropicales, el sargazo representa una fuente renovable de materia prima con un potencial aún poco explorado. El sargazo es un alga rica en nutrientes, polisacáridos, ácidos grasos y aminoácidos, entre otros, que puede utilizarse para crear productos alimenticios y farmacéuticos, biocombustibles y fertilizantes [2]. La

celulosa, el polisacárido estructural más común en la naturaleza y un componente principal del sargazo, ofrece propiedades mecánicas y barreras que pueden rivalizar con las del plástico convencional. Además, su origen biológico y su capacidad de degradación natural la convierten en una alternativa prometedor y sostenible para los envases tradicionales.

La celulosa de madera ha sido tradicionalmente la fuente principal para la producción de papel, cartón y otros productos basados en celulosa. Sin embargo, en los últimos años, la atención del público se ha desplazado hacia fuentes alternativas, como el sargazo, debido a sus ventajas medioambientales y su potencial para la innovación en el desarrollo de materiales sostenibles.

Una de las principales diferencias entre la celulosa de madera y la celulosa de sargazo radica en su origen y disponibilidad. Mientras que la de madera proviene de árboles, cuya explotación puede tener un impacto significativo en los ecosistemas forestales y la biodiversidad, la celulosa de sargazo se obtiene de algas marinas que crecen de forma natural en el medio ambiente marino. Esta diferencia en la fuente de materia prima hace que la celulosa de sargazo sea una opción más sostenible desde el punto de vista ambiental, al no requerir la tala de árboles y al utilizar un recurso renovable y abundante que no ha sido explorado a profundidad.

Además, la celulosa de sargazo presenta ventajas en términos de propiedades físicas y químicas para su aplicación en envases. En comparación con la de madera, la celulosa de sargazo tiende a tener una estructura más uniforme y fibras más largas, lo que puede mejorar la resistencia mecánica y la

flexibilidad del material final. La ausencia de lignina en la celulosa de sargazo también es una gran ventaja, ya que ésta puede requerir procesos adicionales para su eliminación que no solo son contaminantes sino también caros. Además de que puede afectar negativamente a la calidad y la biodegradabilidad del material.

Partiendo del reconocimiento del potencial del sargazo como recurso renovable, se llevó a cabo la extracción de celulosa a partir de sargazo recolectado, utilizando un proceso químico para separar las fibras de celulosa a escala nanométrica. Sus características de baja densidad (menos peso), biodegradabilidad, no toxicidad, sostenibilidad y una alta relación de aspecto, cristalinidad y área superficial han convertido a la celulosa en un biopolímero atractivo para desarrollar una gran cantidad de productos amigables con el medio ambiente y funcionales que pueden entregar grandes beneficios como materia prima para el reemplazo de polímeros y materiales de origen sintético o fósil. En la última década se han expandido los usos de la nanocelulosa a sectores como packaging, alimentos, medicina, sector automotriz, construcción, componentes electrónicos, adhesivos, recubrimientos, textiles, biocompuestos para tratamiento y purificación de agua y biosensores [3].

Con el fin de explorar nuevas aplicaciones y alternativas para el sargazo recolectado, se llevó a cabo la extracción de celulosa a partir de esta alga mediante un proceso de hidrólisis ácida. La hidrólisis ácida es un método efectivo para descomponer la matriz de celulosa del sargazo en nanofibras de celulosa a escala nanométrica, además de ser muy eficiente para obtener celulosa de alta pureza [4]. Este proceso implica el tratamiento del sargazo con ácidos fuertes, como ácido sulfúrico, bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. Como resultado de este proceso, se obtiene celulosa con propiedades únicas y potencialidades diversas en áreas como la nanotecnología, la ingeniería de materiales y la biomedicina.

A través de este proyecto, se tiene como objetivo desarrollar un prototipo de empaques a base de celulosa de sargazo, buscando también contribuir al conocimiento científico en el campo de los materiales sostenibles y proporcionar una solución concreta para reducir la dependencia de los plásticos de un solo uso.

Metodología

El sargazo utilizado en este estudio fue recolectado de las costas de Puerto Morelos, ubicado en el Caribe Mexicano. La selección de esta ubicación se basó en la disponibilidad por temporada y accesibilidad del sargazo en la región, así como en la representatividad de las condiciones ambientales y la composición del sargazo en la zona.

Existen dos métodos de extracción química de celulosa de sargazo: ácida y alcalina. Debido a los resultados que se desea obtener y los materiales y métodos de los que se dispone, se decidió utilizar el método químico de hidrólisis ácida que es más preciso y proporciona más rendimiento.

Antes de iniciar el proceso de hidrólisis ácida, se llevaron a cabo una serie de acondicionamientos para preparar el sargazo recolectado para su procesamiento: la muestra se

lavó, secó y molió (fig. 1) para finalmente tamizar con una malla #40, obteniendo así un polvo de sargazo.



Fig. 1. Molido del sargazo

Para la primera prueba de aislamiento de celulosa se agregaron 5g de polvo de sargazo en un vaso de precipitados de vidrio junto con 100 ml de H_2O_2 en una concentración del 30%, y se calentó a $70^\circ C$ por 60 min (fig. 2).

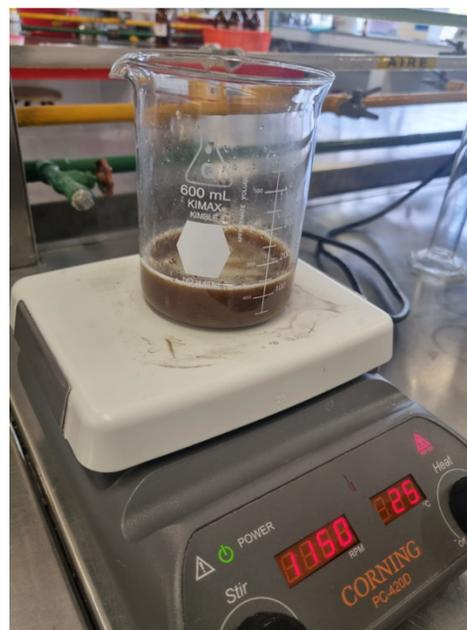


Fig. 2. Polvo de sargazo con H_2O_2 , calentándose.

Posteriormente, se agregaron 50 ml de una mezcla de H_2SO_4 y H_2O_2 (30%) en una relación 1:16, y se mantuvo durante otros 60 min a la misma temperatura constante de $70^\circ C$ (fig. 3). Después, la mezcla se calentó en autoclave, con fines de esterilización, por 60 min a $110^\circ C$ y 0.5 Psi. Finalmente, se extrajo el recipiente una vez que la temperatura descendió a $70^\circ C$.



Fig. 3. Mezcla con H_2SO_4 y H_2O_2

Para concluir el proceso, la muestra se filtró al vacío (fig. 4) y posteriormente se añadieron 100 ml de agua al sólido restante y se neutralizó con NaOH. La muestra se volvió a filtrar y el gel restante se depositó en un recipiente y se dejó secar a temperatura ambiente (fig. 5) [5].



Fig. 4. Filtrado al vacío

Con esto, se obtuvo la celulosa pura, y más adelante esta sirvió como materia prima para que, junto con nuevos componentes como almidón, glicerina y arcilla, se convirtiera en una hoja de papel apta para ser moldeada como empaque más adelante.

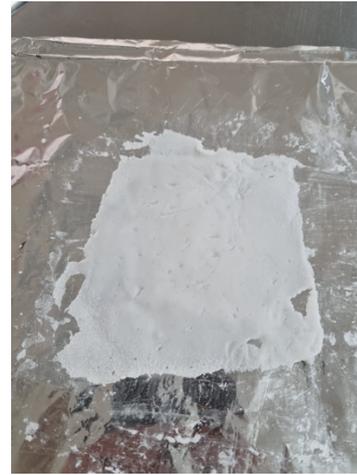


Fig. 5. Gel restante, secándose a temperatura ambiente.

Se realizaron cuatro muestras de extracción de celulosa en diferentes proporciones para medir la cantidad que se puede extraer, observar texturas y llegar a un método estandarizado que proporcione los resultados esperados. A las muestras se les agregó almidón y glicerina en cantidades diferentes para observar su comportamiento después del secado (fig. 6). A la primera muestra se le agregó 0.11 g de glicerina y 0.22 de almidón, siendo así 1% de almidón del total de la muestra y 0.5% de glicerina y se fueron aumentando las cantidades de manera proporcional de muestra en muestra.



Fig. 6. Muestras de extracción de celulosa

Para la siguiente etapa en la que se comenzó la producción del papel para el empaque, por cada 40 g de celulosa se utilizaron 6 ml de papel reciclado remojado en agua para darle mayor consistencia a la mezcla y se le agregaron 2 mg de arcilla hidratada. Con esto, la mezcla se volvió 80% celulosa, 15% papel y 5% arcilla. Se construyó un cedazo (fig. 7) para cernir la mezcla que posteriormente fue utilizada para el diseño y elaboración del papel.



Fig. 7. Cedazo de 14 cm de largo por 10.5 cm de ancho

Se obtuvo una masa húmeda que se esparció en un cristal (fig. 8) para darle forma mas pequeña, y posteriormente se moldeó al grosor esperado, además de que el cristal ayudó a que fuera más sencillo de retirar al final. También se absorbió el exceso de humedad con un trapo limpio y se dejó secar por aproximadamente cuatro horas.



Fig. 8 Mezcla resultada extendida sobre el cristal.

Después del secado se notó que las fibras estaban un poco separadas, por lo que se optó por agregar bagazo de sargazo (fig. 9) para unirlas. Por cada 20 g de mezcla de celulosa con los otros componentes se agregaron 10 g de bagazo.



Fig. 9 Bagazo de sargazo.

Después la mezcla se agregó en 3 diferentes moldes (fig. 10 y 11) para que tomaran la forma deseada y se dejó secar al sol aproximadamente 2 horas y media.



Fig. 10 y 11. Moldes

Finalmente, se encuestó de manera digital a locales de venta aledaños y dentro de la Universidad Iberoamericana Puebla, esto con el fin de analizar la viabilidad de inserción del producto final al mercado.

Resultados y Discusión

La capacidad del sargazo para procesarse y moldearse como una hoja de papel depende de la cantidad y calidad de la celulosa presente en la planta. La celulosa es un biopolímero con peso molecular variable cuya fórmula empírica es $(C_6H_{10}O_5)$ [6]. Es el componente fundamental de la pared de las células vegetales representando generalmente un 35 o 50% de ellas [7].

Para determinar la viabilidad de utilizar el sargazo como materia prima para la producción de papel, se deben considerar varios factores. En primer lugar, el contenido de celulosa en el sargazo, ya que determinará la capacidad del material para formar una hoja de papel resistente. Cuanto mayor sea el contenido de celulosa, mejor será la calidad del papel resultante. En caso del *sargazo spp*, el porcentaje de celulosa es del 20% de su composición [8]. La calidad de la celulosa debe ser tal que esté en condiciones para su procesamiento.

Se compararon las características de la celulosa de madera y de sargazo (Tabla 1), concluyendo que son dos tipos completamente diferentes pero que pueden cumplir con sus funciones a pesar de sus composiciones químicas.

Tabla 1. Comparación de celulosa de sargazo con celulosa de madera

Características	Celulosa de sargazo	Celulosa de madera
Origen	Sargazo, algas marinas	Árboles
Estructura molecular	Nanocelulosa en forma de láminas o escamas.	Polímero lineal de unidades de D-glucopiranosas.
Dimensiones	Nanofibras entrelazadas con un diámetro promedio de 15 nm; longitud variable, relación de aspecto alta.	Largo promedio de cadena de aproximadamente 5 metros; alto grado de polimerización (DP 9,000-15,000)
Composición química	Unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos	Unidades de celobiosa unidas por enlaces glucosídicos
Cristalinidad	No se especifica, pero se menciona la presencia de nanocristales de celulosa.	Altamente cristalina, con hasta un 65% de regiones cristalinas
Métodos de caracterización	MBL y microscopía óptica	No se especifica, pero se menciona el análisis químico, morfológico y degradación de la madera.

Tabla 2. Comparación de métodos de extracción de celulosa de sargazo

	Hidrólisis Ácida	Hidrólisis Alcalina
Condiciones de pH	Un pH inferior a 7, en estas condiciones, los protones (H^+) están en exceso.	Un pH superior a 7. En estas condiciones, los iones hidroxilo (OH^-) están en exceso.
Catalizadores	Por ácidos como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o ácido acético.	Por bases fuertes como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH).
Reacciones	Ruptura de enlaces éster o enlaces de glicósido bajo condiciones ácidas	Ruptura de enlaces éter o enlaces de amida bajo condiciones alcalinas
Productos	El alcohol correspondiente y el ácido o su sal.	La sal correspondiente del ácido carboxílico y el alcohol correspondiente.
Velocidad de Reacción	Generalmente más rápida que la hidrólisis alcalina debido a la mayor concentración de iones H^+ en el medio ácido.	Generalmente más lenta que la hidrólisis ácida debido a la menor concentración de iones OH^- en el medio alcalino
Accesibilidad	Alta. Se cuenta con maquinaria especializada dentro de las instalaciones del IDIT.	Media. No se cuenta con la maquinaria especializada dentro de las instalaciones del IDIT Ibero Puebla. Pero es posible llevarlo a cabo.

Para hacer la selección del proceso de extracción a utilizar, se hizo una comparación de los dos procesos más importantes (Tabla 2) y viables de acuerdo con las instalaciones y materiales con los que se cuentan en la Universidad Iberoamericana Puebla.

Se recurrió a un proceso de hidrólisis química. La hidrólisis es una reacción química en la que moléculas de agua (H_2O) se dividen en sus átomos componentes (hidrógeno y oxígeno). A su vez, en el proceso de hidrólisis, los átomos que componen las moléculas de agua pasan a formar enlaces

químicos con la sustancia que reacciona con el agua. La hidrólisis es una reacción muy importante, pues el agua es el disolvente más usado mundialmente [9].

Para este caso presentado en específico, el proceso más accesible para extraer la celulosa del sargazo y el más eficaz es la hidrólisis ácida. El Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica de la Universidad Iberoamericana Puebla cuenta con la maquinaria e instalaciones adecuadas para la realización de este proceso, además de que la hidrólisis ácida es un proceso químico que, de acuerdo a las comparaciones

realizadas, es más preciso y ayuda a obtener celulosa 100% pura.

A pesar de ser un proceso un poco más tardado, tiene más ventajas que otros procesos, pues se reduce la cristalinidad de la celulosa, y puede experimentarse más debido a que las muestras tomadas pueden volver a integrarse con ciertas

sustancias las veces que sea necesario para sacarle el mejor provecho posible y no pierde su composición original.

Se hizo el diagrama del proceso (Diagrama 1) que se siguió para obtener la celulosa y convertirla en una lámina de papel que al secarse será moldeada y transformada en el producto final.

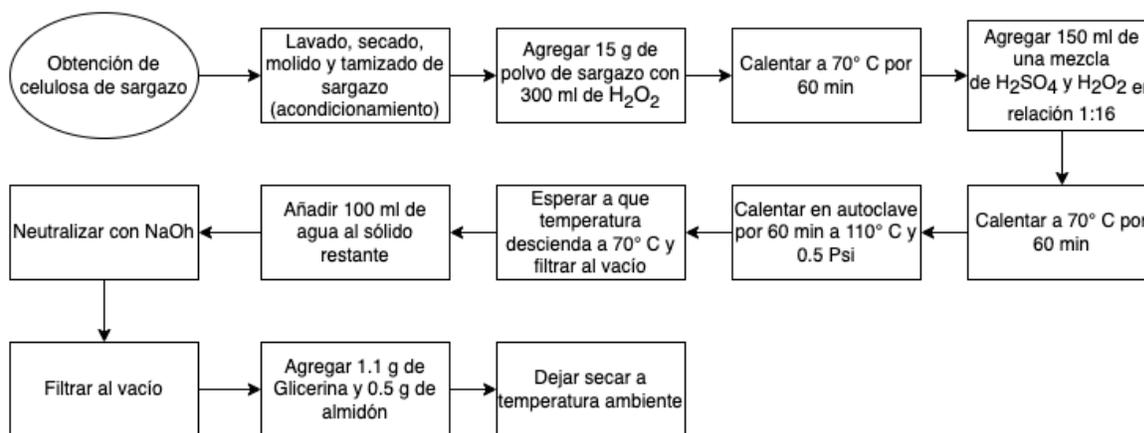


Diagrama 1. Proceso productivo de extracción de nanocelulosa y combinado para mezcla final

Se investigaron las características físicas necesarias para el empaque (Tabla 3). No existe un estándar único y específico para todas las características físicas del empaque en México. Las especificaciones pueden variar según el tipo de empaque, su uso previsto y las necesidades del cliente. Además, las normativas aplicables pueden depender del sector industrial al que se destinen. Algunas medidas generales se enlistaron en la siguiente tabla.

Tabla 3. Características físicas de empaques en México

Gramaje de papel	80 g/m ²
Resistencia a la tracción	30 N/m
Resistencia al desgarro	10 N
Resistencia al puncionado	20 N

Después del moldeado y secado final, se obtuvo un prototipo de empaques para diversos usos de acuerdo con las características con las que se fabrique (Fig. 12 y 13). Este cumple con su función y también aborda de manera efectiva el desafío de la contaminación por sargazo en las playas de Puerto Morelos. Al utilizar el residuo de sargazo como materia prima principal, este prototipo demuestra el potencial de convertir un problema ambiental en una oportunidad para la innovación y el desarrollo sostenible.



Fig. 12. Prototipo después del secado



Fig. 13. Posible uso del prototipo

Se realizó también un análisis de gastos directos para poder determinar el costo final de producción unitario. El cálculo se hizo por medio de una plantilla en Excel, en la que se calcularon los costos de materias primas directas y mano de

obra. Se obtuvieron los costos de producción a base de las seis materias primas directas para la fabricación: Sargazo, ácido Sulfúrico, agua oxigenada al 30%, glicerina, almidón e hidróxido de sodio (Tabla 4).

Tabla 4. Gastos directos en producción de empaque a base de celulosa de sargazo

No.	Materias primas directas	Cantidad utilizada	Unidad de medida utilizada	Total en unidad de compra	Costo unitario	Costo por unidad de medida
1	Sargazo		mg	500	\$ -	\$ -
2	Agua oxigenada 30%	300	mlitros	4000	\$ 40.00	\$ 3.00
3	Ácido sulfúrico	30	mlitros	1000	\$ 20.00	\$ 0.60
4	Glicerina	0.45	mlitros	1000	\$ 20.00	\$ 0.01
5	Almidón	1	mg	500	\$ 62.00	\$ 0.12
6	Hidróxido de sodio	1	mg	500	\$ 70.00	\$ 0.14
7	Arcilla	2	mg	5000	\$ 40.00	\$ 0.02
				TOTAL	\$ 212.00	\$ 2.67

Para la investigación cualitativa se realizó una encuesta a diferentes negocios locales con el fin de conocer sus opiniones acerca del proyecto, éste sirvió para identificar la necesidad del cliente ante el producto y evaluar la oportunidad dentro de este mercado. Se realizaron preguntas cerradas.

Con ésta serie de preguntas también se recabó información sobre la aceptación del producto para el cliente potencial, mapear la oferta y la demanda y establecer los rangos del costo del producto.

El 85.7% de los encuestados respondieron que sí conocen la problemática del sargazo existente en las playas del Caribe Mexicano, y el otro 14.3% respondió que no.

El 42.9% de los encuestados respondieron que del 75 al 100% de sus productos son para llevar. Y el otro 28.6% de los encuestados respondió que entre el 25 y 75% de sus pedidos son para llevar. Y el porcentaje restante de los encuestados respondió que entre el 0 y 50% de sus ventas son para llevar.

El 71.4% de los encuestados respondieron que sí utilizan bolsas tanto de plástico como de papel para envolver sus artículos, y el otro 28.6% respondió que no utilizan pero que si les gustaría.

El 83.3% de los encuestados respondieron que sí estarían dispuestos a utilizar bolsas amigables con el medio ambiente, y el otro 16.7% correspondió a una respuesta de tal vez.

El 33.33% de los encuestados respondió que estarían dispuestos a pagar de 30 a 40 pesos mexicanos por un paquete de 10 bolsas a sabiendas de que representaría un costo mayor. El otro 33.3% de las respuestas optó por un precio entre 20 a 30 pesos mexicanos y por último el otro 33.3% optó por un precio de entre 10 a 20 pesos.

También se desarrolló un modelo de negocio Canvas (Fig. 14) para visualizar la idea del negocio en un futuro de manera más visual y concisa. Además permitió identificar claramente los segmentos del mercado objetivo a los que se dirigirá el negocio, incluyendo el entendimiento y deseos de los clientes potenciales. Se definió la propuesta de valor del negocio destacando los beneficios clave. También se exploraron los canales de distribución y sobre todo una planeación estratégica clara y coherente para la maximización del negocio y su potencial de éxito en el mercado.

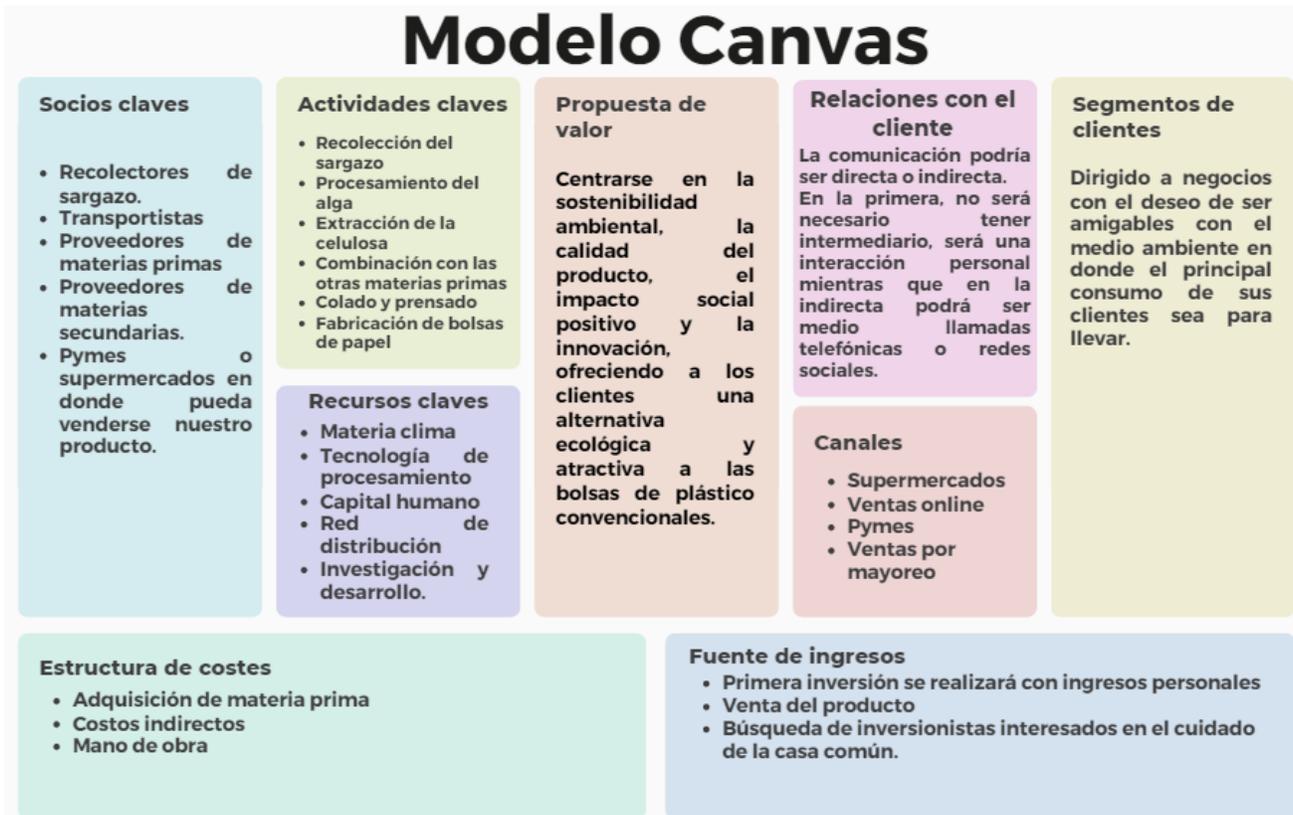


Fig. 14. Modelo Canvas

Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

Explorar el uso del sargazo como materia prima abre la puerta a una serie de oportunidades para la innovación y el desarrollo sostenible. Desde la producción de biopolímeros y biocombustibles hasta la fabricación de empaques y productos de uso cotidiano, el sargazo tiene el potencial de convertirse en una fuente renovable y versátil de materias primas.

Se desarrolló un prototipo, y si bien no se llegó al resultado idóneo, este cuenta con ciertas propiedades que ayudan a que cumpla parcialmente con su función: se puede dibujar sobre él, es maleable y se puede cortar; este conjunto de atributos contribuye a que el empaque desarrollado pueda ser utilizado en una variedad de entornos una vez que el proceso de diseño y manufactura sea perfeccionado.

Como proceso químico, sí se llegó al resultado, pues mediante la hidrólisis ácida se pudo extraer la celulosa de manera satisfactoria.

El Modelo de Negocio Canvas permitió visualizar de manera más gráfica y sobre todo analizar todos los aspectos clave que deben considerarse en caso de llevar a cabo el proyecto como negocio, desde la propuesta de valor hasta la estructura de costos. Además, ayudó a entender la viabilidad del proyecto al identificar los recursos necesarios, socios clave, segmentos de clientes, canales de distribución y más, proporcionando una visión mucho más clara para poder desarrollar estrategias efectivas en caso de así desarrollarlo.

Al aprovechar el sargazo de manera responsable y sostenible, no solo se puede abordar el problema de la contaminación costera, sino también contribuir a la economía local y promover prácticas más respetuosas con el medio ambiente. Es fundamental que se fomente la investigación y la colaboración entre diferentes sectores para encontrar soluciones innovadoras y escalables que permitan aprovechar plenamente el potencial del sargazo como recurso.

Referencias

- [1] “EL SARGAZO EN LAS COSTAS MEXICANAS – Dirección de Comunicación de la Ciencia”. Universidad Veracruzana. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/el-sargazo-en-las-costa-mexicanas/>
- [2] “¿Qué es el sargazo y cuáles son sus consecuencias?” BBVA NOTICIAS. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-alga-color-cafe-que-cubre-las-playas-que-es-el-sargazo-y-cuales-son-sus-consecuencias/>
- [3] M. Seguel. “Nanocelulosa: El material del futuro que es más fuerte y liviano que el acero - Universidad de Chile”. Universidad de Chile. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://uchile.cl/noticias/205647/nanocelulosa-el-material-del-futuro-mas-fuerte-y-liviano-que-el-acero>
- [4] R. Hernández, A. Álvarez, A. Olarte y A. Salgado. “Obtención de nanocelulosa a partir de residuos postcosecha”. SCIELO. Accedido el 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912023000100305
- [5] J. S. Mendoza, A. Toxqui Terán, L. Elizande Herrera, O. Pérez Camacho, y L. Chávez Guerrero, «Aislamiento de nanocelulosa 2D a partir de la pared celular de Sargassum spp », QUIMICAHOY, vol. 11, n.º 04, pp. 19–27, dic. 2022.
- [6] L. Lin, X. Kan, H. Yan y D. Wang. “Characterization of extracellular cellulose-degrading enzymes from Bacillus thuringiensis strains”. SciELO - Scientific electronic library online. Accedido el 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-34582012000300002
- [7] Megías M, Molist P, Pombal MA. Atlas de histología vegetal y animal. <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html>. Accedido el 24 de abril de 2023. [En línea]. Disponible: <https://mmegias.webs.uvigo.es/5-celulas/ampliaciones/2-pared-celular.php>
- [8] Rabemanolontsoa, Harifara & Saka, Shiro. (2013). Comparative study on chemical composition of various biomass species. RSC Advances. 3. 3946-3956. 10.1039/C3RA22958K.
- [9] Dianelys Ondarse Álvarez. “Hidrólisis - Concepto, proceso y tipos”. Concepto. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://concepto.de/hidrolisis/>