



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIA DE MATERIALES SUSTENTABLES

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE
HIDROGELES A BASE DE CARRIZO
(*PHRAGMITES AUSTRALIS*) Y TULE (*TYPHA
DOMINGENSIS*) PARA LA RESTAURACIÓN DE
SUELOS DEGRADADOS.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIA DE MATERIALES SUSTENTABLES

P R E S E N T A

SOFÍA ARLETTE HOFFMANN PORTILLA

DIRECTOR DE TESIS: Roberto Lindig Cisneros

MORELIA, MICHOACÁN

ENERO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
UNAM
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 01** del **Comité Académico** de la **Licenciatura en Ciencia de Materiales Sustentables** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia, celebrada el día **15 de febrero de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Sofía Arlette Hoffmann Portilla** de la Licenciatura en **Ciencia de Materiales Sustentables**, con número de cuenta **418128954**, con el trabajo titulado: "**Síntesis y caracterización de hidrogeles a base de carrizo (*phragmites australis*) y tule (*typha domingensis*) para la restauración de suelos degradados**", bajo la dirección como tutor del **Dr. Roberto Antonio Linding Cisneros**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Jonh Larsen
Vocal:	Dr. José Núñez González
Secretario:	Dr. Roberto Antonio Linding Cisneros
Suplente:	Dra. Alejandra Castro Carranza
Suplente:	Dr. Daniel Roja Solís

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 12 de abril de 2023.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

A mis padres

Agradecimientos institucionales

Agradezco inmensamente al Dr. Roberto Lindig por su guía y apoyo a lo largo de este proyecto, y por compartir conmigo sus conocimientos.

Al financiamiento por parte del proyecto IG200221 de PAPIIT, DGAPA, UNAM que hicieron posible esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todas las experiencias y conocimientos que me permitieron desarrollarme intelectual y socialmente. Y especialmente a la Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Morelia, por ser mi casa todos estos años, así como al Instituto de Investigación en Ecosistemas y Sustentabilidad por abrirme sus puertas durante este proyecto.

Al Dr. José Núñez, Dr. John Larsen, Dra. Alejandra Castro y Dr. Daniel Rojas por aceptar formar parte del jurado y proporcionarme sus comentarios para complementar esta tesis.

Agradecimientos personales

Nuevamente quiero agradecer al Dr. Roberto Lindig, por recordarme la emoción y felicidad de hacer ciencia, sensaciones que estaba perdiendo, así como por la serenidad en momentos difíciles.

A mi familia, por su apoyo en cada momento. A mi papá, cuya presencia y amor nunca voy a dejar de sentir, y sus enseñanzas que nunca voy a olvidar. A mi mamá por superar todas las adversidades, por escucharme, aconsejarme y apapacharme. A mis hermanos y el amor tan puro que les tengo. A mis sobrinas por darle luz y calor a mis días con sus risas, sus abrazos y sus travesuras, y por ser mi motivación para ser mejor persona, mejor tía y mejor ejemplo. A mis primas: Conchis, Estela y Alma (y Karas, claro), por alegrar mis días en Xico. A Odile y Mele, por su apoyo e interés en saberme bien.

Recalcando mi agradecimiento a Conchis, mi primata casi hermana. Gracias por compartir conmigo tu tiempo, tu amor y tu sabiduría, gracias por hacer de la pandemia un bonito recuerdo lleno de amaneceres, caminatas, desayunos y risas.

A los amigos que me salvaron la vida, muchas más veces de las que creen, a Vale y Qoty por mantenerse en mi corazón desde hace casi veinte años. A Max, Lalo y Bolis, siempre van a ser ustedes tres. A Viri, Betty y también a Dereck por ser tan bello. A los amigos de la universidad por las experiencias y las risas en Morelia y Xico.

Especialmente a Aldo, por ser mi familia durante los mejores semestres de la carrera, por las idas al hospital, por las comidas y por hacer de nuestra casa un hogar.

A Ballinas, por salvarme, por ser mi lugar seguro. Tus escuchas y tu cariño son y serán siempre una motivación para mí.

A Fany por las horas en el laboratorio muriendo de estrés, sueño y cansancio, pero

sintiéndome feliz por tenerlos. Por cuidarme y permitirme ser vulnerable.

A Ethel y a María, por las noches de chicas, las pláticas y las risas, los consejos y el cariño.

A los que fueron mis roomies por menos tiempo pero que hicieron de mi estadía algo bonito: a Dani, Fanny y Cristian.

A los que me cuidaron, me llevaron a los hospitales, me alimentaron y estuvieron atentos: Cheché, Pablo, Cristian, Aldo y Aarón.

A los que conocieron Xico e hicieron los veranos momentos inolvidables: Aldo, Cheché, Ethel, Dani, Fany, María, Pablo, Jorge, Ballinas y Aarón.

A Andrés, por su apoyo y por su amor. Gracias por darme la energía necesaria y levantarme cuando no tuve fuerzas. Por ser mi escucha en los momentos más difíciles y darme tu mano cuando sentía que me perdía.

A mis padrinos David y Nelly, por estar siempre presentes, pocos tenemos la dicha de tener padrinos como ustedes.

ÍNDICE

Índice general

ÍNDICE	v
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
2 JUSTIFICACIÓN	4
3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	5
4 OBJETIVOS	6
§4.1 Objetivo general	6
§4.2 Objetivos específicos	6
5 ANTECEDENTES	7

ÍNDICE GENERAL

VI

§5.1 Suelo	8
§5.1.1 Definición e importancia	8
§5.1.2 Situación de degradación	10
§5.2 Agua	12
§5.2.1 Definición e importancia	12
§5.2.2 Situación actual y previsiones	13
§5.3 Humedales	14
§5.3.1 Definición e importancia	14
§5.3.2 Especies invasoras y pérdida de biodiversidad	22
§5.3.3 El caso de la Mintzita en Morelia, Michoacán	24
§5.4 Carrizo	29
§5.4.1 Definición y características	30
§5.4.2 Catálogo de usos	30
§5.4.3 Plan de manejo en humedales	32
§5.5 Tule	35
§5.5.1 Definición y características	36
§5.5.2 Catálogo de usos	37
§5.5.3 Plan de manejo en humedales	38
§5.6 Hidrogeles	38
§5.6.1 Definición	38
§5.6.2 Características y propiedades	39
§5.6.3 Clasificación y usos	41
§5.6.4 Síntesis convencional y sus consecuencias	44
6 METODOLOGÍA	45
§6.1 Recolección y separación del carrizo y el tule	46
§6.2 Síntesis de los hidrogeles	46

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
§6.2.1 Secado y molido de la materia prima	46
§6.2.2 Extracción de celulosa	48
§6.2.3 Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC)	53
§6.2.4 Síntesis de los hidrogeles	57
§6.2.5 Resumen del proceso completo	58
7 RESULTADOS	60
§7.1 Pruebas de eficiencia	60
§7.1.1 Espectroscopía	61
§7.1.2 Pruebas de hinchamiento	64
§7.1.3 Pruebas de toxicidad con bacterias	65
§7.2 Análisis de datos	67
8 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	69
§8.1 Discusión	69
§8.2 Conclusiones	72
9 BIBLIOGRAFÍA	74

Índice de figuras

5.1	Banco Mundial (2021). <i>Porcentaje del PIB de la agricultura</i> . Recuperado de https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?type=shadedview=map	9
5.2	Rodríguez-Arias et al., (2018). <i>Ubicación de la Mintzita</i>	25
5.3	<i>Dibujo representativo del carrizo</i> . Elaboración propia	29
5.4	<i>Usos del carrizo</i> . Elaboración propia	31
5.5	<i>Dibujo representativo del tule</i> . Elaboración propia.	35
5.6	<i>Usos del tule</i> . Elaboración propia	37
5.7	<i>Clasificación de los hidrogeles</i> . Elaboración propia	42
5.8	<i>Espectroscopía IR del hidrogel de referencia</i> . (Abdulhameed et al., 2020) . .	43
6.1	<i>Polvo obtenido del molido del carrizo</i>	47
6.2	<i>Polvo obtenido del molido del tule</i>	48
6.3	<i>A la izquierda: Reacción de extracción de celulosa del carrizo. A la derecha: Reacción de extracción de celulosa del Tule</i>	49
6.4	<i>Celulosa húmeda</i>	51
6.5	<i>Celulosa seca</i>	52
6.6	<i>Reacción de carboxitilación por el Método 1</i>	54
6.7	<i>A la izquierda: hidrogel de tule. A la derecha: hidrogel de carrizo</i>	58
6.8	Proceso completo llevado a cabo para la síntesis de los hidrogeles de este trabajo	59

7.1	<i>Espectroscopía IR de la celulosa obtenida del carrizo</i>	61
7.2	<i>Espectroscopía IR de la celulosa obtenida del tule</i>	62
7.3	<i>Espectroscopía IR de la CMC obtenida del carrizo</i>	62
7.4	<i>Espectroscopía IR de la CMC obtenida del tule</i>	63
7.5	<i>Espectroscopía IR del hidrogel obtenido del carrizo</i>	63
7.6	<i>Espectroscopía IR del hidrogel obtenido del tule</i>	64
7.7	<i>Colonias de bacterias por mililitro</i>	66

RESUMEN

En el presente trabajo se sintetizaron hidrogeles a base de celulosa, utilizando como materia prima las especies *Phragmites australis* y *Typha domingensis*, ambas siendo consideradas especies invasoras y con gran presencia en el manantial de la Mintzita en Morelia, Michoacán.

El desarrollo de la síntesis de dichos hidrogeles consistió en evaluar la posibilidad de modificar la composición convencional de los hidrogeles comerciales para utilizar sus propiedades de absorción y retención de agua al mismo tiempo de disminuir sus impactos ambientales y, de esta manera, obtener un material amigable con el medio ambiente que ayude a mejorar las propiedades hídricas de los suelos.

El proceso llevado a cabo consistió en una purificación de la materia prima, es decir, la extracción de celulosa a partir de la cosecha de las especies utilizadas para emplearla como reactivo sustituyente de la acrilamida (reactivo convencional en la síntesis de hidrogeles)

Los hidrogeles obtenidos fueron sometidos a pruebas de espectroscopia IR que confirmó que se trata del material esperado. También fueron evaluados en cuanto a su capacidad de hinchamiento, así como su toxicidad. Los resultados sugieren que se trata de un material eficaz y biodegradable.

ABSTRACT

In the present work, cellulose-based hydrogels were synthesised using the species *Phragmites australis* and *Typha domingensis* as raw materials. Both species are considered invasive and are largely present in the Mintzita spring in Morelia, Michoacán.

The synthesis process of these hydrogels consisted of evaluating the possibility of modifying the conventional composition of commercial hydrogels to use their water absorption and retention properties whilst reducing their environmental impacts to obtain an environmentally friendly material that helps to improve the water properties of soil.

The process consisted of a purification of the raw material, i.e. the extraction of cellulose from the species to use it as a substitute reagent for acrylamide (conventional reagent in the synthesis of hydrogels).

The resulting hydrogels were subjected to IR spectroscopy tests which confirmed that they are the expected material. They were also evaluated for their swelling capacity as well as their toxicity. The results suggest that it is an effective and biodegradable materia.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las distintas actividades humanas como la minería, ganadería, agricultura, industrialización y urbanización generan cambios en la calidad y condiciones biogeoquímicas del suelo, que puede tener como consecuencia última la degradación de éste al grado de impedir el desarrollo de especies vegetales y, por tanto, animales (González, 2003). Lo anterior se considera un problema desde el punto de vista de la pérdida de la biodiversidad, pero sobre todo desde el punto de vista de los servicios ecosistémicos. Un suelo degradado no permite ni la proliferación de especies animales y vegetales para mantener la diversidad ecológica, ni el cultivo tan necesario para el sistema económico (Verburg, G. et Al, 2019).

Debido a esto, se han buscado y propuesto diversas alternativas para restaurar estos suelos y hacerlos nuevamente útiles, por ejemplo, el uso de especies vegetales para descontaminar los suelos (fitorremediación), o la implementación de sistemas de acolchados (materiales que se colocan en la superficie del suelo) para evitar desecación y mantener temperaturas óptimas para el desarrollo vegetativo (Lindig Cisneros, 2017).

El uso de hidrogeles como aditivos del suelo resulta una alternativa atractiva ante el problema de la degradación del suelo. Un hidrogel es un polímero hidrófilo insoluble en agua cuya principal propiedad se encuentra en su capacidad de absorción de agua, que se

manifiesta visualmente como un “hinchamiento” del material (Benítez et al., 2015). Esta característica de absorción -y retención- de agua los hace un material atractivo para utilizarse en la restauración ambiental, con fines de mejorar las condiciones del suelo en cuanto a la disponibilidad de agua para las plantas. Sin embargo, los hidrogeles convencionales se producen con acrilamida, compuesto que ha sido clasificado como "probable carcinógeno para los humanos"(clase 2A) por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), como cancerígeno en la categoría 2 de la Unión Europea, así como mutágeno en la categoría 2 y tóxico para la reproducción en la categoría 3 de la Unión Europea (Moreno Navarro et al., 2007).

Se pueden sintetizar hidrogeles con base en otros compuestos orgánicos, como la celulosa. Pero es importante buscar alternativas en su síntesis para hacerlo de manera sustentable. El uso de celulosa extraída de especies vegetales invasoras como materia prima en la elaboración de hidrogeles podría ser una opción sustentable y se eliminaría el riesgo por toxicidad que tienen hidrogeles basados en otros compuestos orgánicos como ya se mencionó (Shahzamani et al., 2020).

Por lo tanto, los hidrogeles a base de celulosa son una alternativa a aquellos de acrilamida; mejoran también la retención de agua y cumplen con los principios de la química verde. La celulosa se puede obtener de distintas especies vegetales. Sin embargo, es importante hacer una evaluación rigurosa de tal manera que no se dañe a los ecosistemas. Para esto, el uso de especies invasoras o malezoides es prometedor, en este sentido, una opción interesante es el uso del carrizo (*Phragmites australis*) y de tule (*Typha domingensis*) como fuente de celulosa. Estas especies vegetales se consideran invasivas y tienen gran presencia en el estado de Michoacán y gran parte del occidente de México, en zonas de humedales (Escutia-Lara et al., 2012; Gámez Yáñez Lindig-Cisneros, 2013). Como especies invasoras, dificultan o impiden el desarrollo de especies nativas causan pérdidas de biodiversidad y de servicios ecosistémicos (Kalesnik. Malvarez, 2019).

Existen varios estudios que se interesan en la manera correcta de controlar la propaga-

ción de esta especie, de allí concluimos que la manera más eficaz es la cosecha y es que otros factores de estrés (como la quema controlada o el uso de herbicidas) pueden afectar más a las especies nativas empeorando el problema de invasión. La cosecha nos permite extraer la celulosa de la planta de manera eficiente energética y económicamente. (Escutia-Lara et al., 2012).

Capítulo 2

JUSTIFICACIÓN

Resolver la situación de los suelos degradados puede clasificarse como de carácter urgente debido a su importancia económica y de alimentación. Enfocándonos específicamente a la desecación, debemos considerar también que la disponibilidad de agua es cada vez menor, por lo que no solamente debemos buscar soluciones en cuanto a la absorción del agua en el suelo, sino también que debemos aspirar a darle el mayor aprovechamiento posible, es decir, a aumentar la eficiencia en su uso.

Usar hidrogeles como parte del sustrato de los suelos degradados permite, además de absorber el agua que les sea proporcionada (por cualquier medio), mejorar la capacidad de retención de la misma, permitiendo la proliferación de distintas especies vegetales. Un suelo que sostiene un buen sistema vegetativo, es un suelo que proporciona buenos servicios ecosistémicos y mayor diversidad, pero también que es capaz de mantener cosechas con mejores resultados, es decir, mayor rendimiento del producto, con menor inversión en el riego. Es por ello, que el uso de hidrogeles en la restauración ambiental resulta una alternativa llamativa, con alto potencial y enorme interés en varios sectores de la población. Sin embargo, su implementación a macro-escala no puede llevarse a cabo sin un adecuado proceso de investigación.

Capítulo 3

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible sintetizar hidrogeles a partir de celulosa obtenida de especies vegetales invasoras?

¿Son los hidrogeles sintetizados a partir de celulosa de especies invasoras biodegradables?

Capítulo 4

OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Sintetizar hidrogeles a base de celulosa extraída del carrizo (*Phragmites australis*) y del tule (*Typha domingensis*) para mejorar la capacidad de retención de agua en suelos degradados y probar la viabilidad de usar especies invasoras como fuente de celulosa.

4.2. Objetivos específicos

Explorar el potencial del carrizo y el tule para sintetizar hidrogeles.

Probar el efecto de hidrogeles de diversos orígenes para mejorar la capacidad de retención de agua en suelos degradados.

Probar la interacción entre los hidrogeles y bacterias nativas del suelo (*Herbaspirillum huttiense*).

Capítulo 5

ANTECEDENTES

Con motivo de entender de mejor manera la importancia de la restauración y conservación ambiental, así como las razones de la síntesis de un material capaz de mejorar aspectos en la calidad del suelo, como es el caso del hidrogel, se presentan a continuación los antecedentes referentes al tema de este trabajo.

Resulta imprescindible comprender el papel que juega el suelo y el agua en el desarrollo de los ecosistemas -y, por tanto, en nuestras vidas-, así como su situación actual. Por otro lado, se debe comprender también las dinámicas de las especies invasoras, sus consecuencias y el caso específico en los humedales, siendo éste el ecosistema proveedor de la materia prima de los hidrogeles sintetizados en el presente trabajo.

Por último, se presentan los datos que ya se tienen de los hidrogeles convencionales, así como los aspectos a modificar como científicos de los materiales sustentables.

5.1. Suelo

5.1.1. Definición e importancia

El Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, define al suelo como la capa de materiales orgánicos y minerales que cubre la corteza terrestre, que de manera natural está continuamente en formación por la desintegración de rocas adyacentes, el acarreo de materiales diversos por el viento y el agua y, por la acumulación de residuos de los micro y macro organismos que transitan o habitan en esta capa. A pesar de que sus componentes podrían darle la propiedad de ser un recurso renovable, lo cierto es que no lo es y esto se debe a que el tiempo de formación del suelo es mucho mayor al tiempo de degradación; la formación de 1cm de suelo toma como mínimo 100 años, aunque en algunos casos pueden transcurrir hasta 1000 años (CEDRSSA, 2019).

En el suelo se tiene el primer y último escalón de la cadena alimenticia. Es decir, en el suelo se produce la materia vegetal (primer eslabón) y se degrada la materia orgánica tras la muerte del último depredador (último eslabón). Lo anterior pone en evidencia la importancia del recurso. Sin embargo, una manera más representativa de comprender su importancia es analizándola desde dos puntos: los servicios económicos y los servicios ecosistémicos que provee, siendo el primero, pilar de las sociedades; y el segundo, la base del bienestar tanto de seres humanos como del planeta en general.

Enfocándonos en los servicios económicos, un suelo sano es imprescindible para la agricultura y ésta es esencial para el crecimiento económico. En el año 2021, representó un 4% del PIB mundial y un 3.8% en México, aunque en algunos países representa más del 28% (Banco Mundial, 2021). A continuación, se muestra un mapa representativo del porcentaje que representa la agricultura al PIB de cada país.

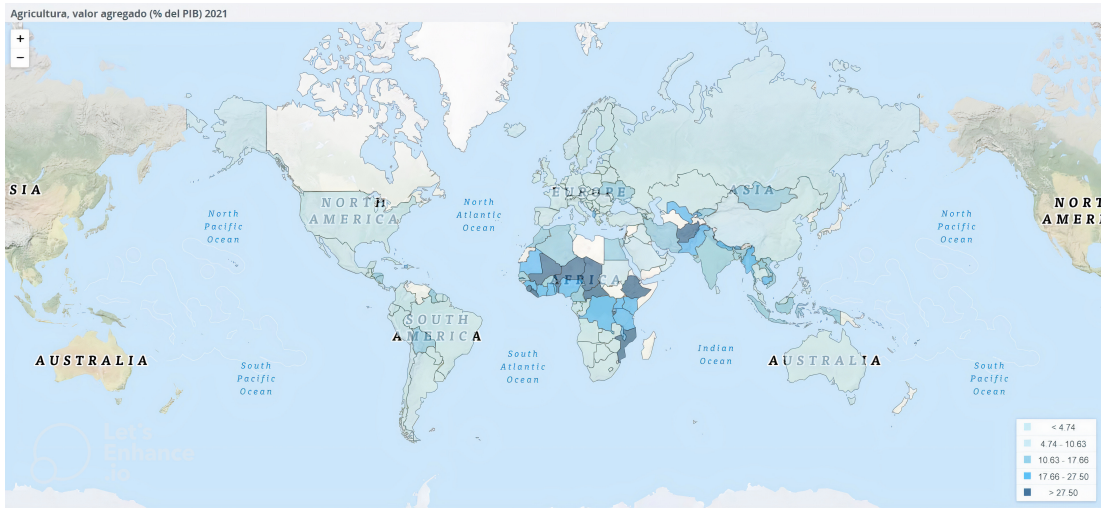


Figura 5.1: Banco Mundial (2021). *Porcentaje del PIB de la agricultura*. Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?type=shadedview=map>

Además de la agricultura, existen otras actividades económicas que dependen del suelo, como lo son: la explotación forestal, la ganadería, la producción de distintos tipos de combustible (desde carbón hasta biodiesel), y la extracción de materias primas en general (Burbano, 2016).

Sin embargo, a pesar de que estas actividades dependen del suelo, no suelen cuidarlo sino degradarlo, haciéndolo cada vez menos sano y, por tanto, menos útil.

Del lado de los servicios ecosistémicos, podemos regresar a hablar de la cadena alimenticia. De manera general, se puede decir que del suelo depende el resto de los seres vivos y es que es ahí en donde se desarrollan las plantas (y otras especies vegetales) que son el primer eslabón de la cadena y sin ellas el resto de la vida no podría llevarse a cabo. Sin embargo, existen muchos más servicios ecosistémicos que provee, tales como:

- Soporte para ecosistemas y civilizaciones.

- Absorción y retención de agua, siendo esta imprescindible para el desarrollo de la vida (Cram et al., 2008) .
- Degradación de desechos a través de interacciones físicas y bioquímicas con sus componentes (Burbano, 2016).
- Escudo para aguas subterráneas: filtrando contaminantes y reduciendo toxicidad (Cram et al., 2008) .
- Hábitat de un gran número de organismos: El suelo alberga una cuarta parte de la biodiversidad del planeta (FAO, 2015).
- Provisión de alimentos: 95 % de los alimentos del mundo se producen en el suelo directa o indirectamente. (CEDRSSA, 2019).

5.1.2. Situación de degradación

La degradación del suelo se refiere a la disminución de su calidad, es decir, su fertilidad, capacidad de retención de agua, biodiversidad y, por tanto, su utilidad. Esta degradación es producto de diversas acciones del ser humano como lo es la agricultura, urbanización, ganadería, entre otros. Todas estas acciones implican la remoción del manto vegetativo para ser reemplazado por cultivos poco diversos (incluso monocultivos) o simplemente quitar para la construcción de edificios, carreteras e infraestructura en general. Tan solo las prácticas agrícolas actuales provocan una erosión de hasta 100 veces más rápida de lo que los procesos naturales pudieran reponer, provocando una extensión creciente de suelos degradados que requieren ser restaurados.(UNCCD, 2022).

Actualmente, se estima que el 70 % de la tierra libre de hielo ya está siendo explotada por el hombre ya sea con fines agrícolas, económicos o de vivienda, esta misma estimación prevé una ocupación del 90 % de la tierra para actividades antrópicas (UNCCD, 2022). La explotación de los recursos del suelo por parte de los seres humanos tiene consecuencias directas en la calidad del mismo, es decir, provoca su degradación. En el caso de México, entre 1985 y 2014 la superficie nacional con vegetación primaria (sin alteración o degradación) tuvo una disminución del 9.4 % (INEGI, 2021).

Mundialmente, el 33 % de los suelos del planeta están moderada o altamente degradados por la erosión, salinización, compactación, acidificación, contaminación química y pérdida de nutrientes (FAO, 2015).

La degradación del suelo supone un grave problema no solamente en cuanto a la pérdida de biodiversidad que tanto preocupa a la comunidad de las ciencias sustentables, sino que es un fenómeno severo económicamente ya que disminuye el rendimiento de las cosechas (Pimentel et al., 1995). Una disminución en la capacidad de producir alimentos es también alarmante a nivel de salud y bienestar, tomando en cuenta que la situación de hambruna en el mundo es cada vez más crítica (Burbano, 2016).

Una de las maneras con las que se ha buscado compensar la disminución del rendimiento del suelo para producir alimentos es el uso de fertilizantes y plaguicidas, lo que desemboca en una contaminación química que afecta directamente en la salud del suelo. Sin embargo, el uso más eficiente del agua, la reducción del empleo de plaguicidas y la mejora de la salud del suelo pueden dar lugar a un aumento medio del rendimiento de los cultivos del 79 % (FAO, 2015).

Por otra parte, se ha buscado implementar técnicas que permitan cultivar el suelo conservando al máximo su calidad, surgiendo de esta manera el concepto de *agricultura sostenible/ecológica* (Punschke Mayans, 2012). Una de éstas técnicas es el uso de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV). Se trata de bacterias de la rizosfera que establecen una simbiosis asociativa con la planta (Antoun Prévost, 2006), promoviendo

su crecimiento a través de mecanismos como la fijación de nitrógeno, regulación de los niveles de fitohormonas y protección ante enfermedades transmitidas por el suelo (Gamalero Glick, 2011; Loredó-Ostí et al., 2004; Punschke Mayans, 2012). Un ejemplo destacado de este tipo de bacterias es el grupo *Herbaspirillum ssp.* que posee la capacidad de asociarse con una amplia variedad de plantas (Punschke Mayans, 2012).

5.2. Agua

5.2.1. Definición e importancia

El Sistema Nacional de Información del Agua (2022) establece al agua como un recurso natural considerado como renovable debido a que puede ser obtenido a través de procesos naturales (ciclo hidrológico). Sin embargo, estos procesos implican el depósito del agua en acuíferos con periodos de renovación largos, por los que se les considera como no renovables (CONAGUA, 2018). Es llamado también como “recurso vital” debido a su carácter imprescindible para el desarrollo de la vida. Esto último convierte al agua en un derecho humano que debe ser cubierto (Van de Lande, 2015).

Su importancia reside no solamente en su consumo para cubrir la necesidad vital del ser humano, sino también en su uso para la agricultura, la ganadería, la industria, la energía, la adaptación al cambio climático, y el desarrollo de los ecosistemas (Carmona-Moreno et al., 2001).

5.2.2. Situación actual y previsiones

Hablar de la situación del agua, es hablar de su disponibilidad y su uso.

La disponibilidad del agua disminuye a medida que aumenta la población y, con ello, la demanda de bienes y servicios. Una manera de medirla es dividiendo los recursos renovables entre el número de habitantes (agua renovable per cápita) (CONAGUA, 2018).

Actualmente se habla de una crisis del agua y es que, a medida que el recurso disminuye (ya sea por contaminación o acaparamiento) la población mundial crece. Hoy en día se calcula que la población mundial es de 7 954 millones de habitantes (UNFPA, 2022). Sin embargo, está previsto que la población mundial alcance los 8 500 millones en 2030, 9 700 millones en 2050 y 11 200 millones en 2100 (ONU, 2021).

Según datos del Banco Mundial, el recurso de agua dulce renovable per cápita mundial en 1992 era de 8 millones de metros cúbicos; en el 2018 disminuyó hasta 5.6 millones. En México, la cifra pasó de 4.7 millones de metros cúbicos en 1992, a 3.2 millones en el 2018.

La baja disponibilidad de agua se traduce en problemas alimenticios, de salud y de bienestar en general. 2300 millones de personas viven en países con estrés hídrico (es decir, que la demanda del recurso es mayor a su disponibilidad), de los cuales 733 millones viven en países con estrés hídrico alto y crítico. (ONU, 2021). Es importante señalar que se habla de disponibilidad de agua cuando ésta puede ser consumida, es decir: agua trata y/o potable. Cuando el recurso no es apto para su consumo, entonces se considera como no disponible ya que no aporta al bienestar humano, como es el caso de los lugares que se abastecen de agua contaminada: 297 000 niños menores de cinco años mueren cada año debido a enfermedades diarreicas causadas por las malas condiciones sanitarias o agua no potable (UNICEF, 2022).

El consumo de agua dulce no representa los mismos porcentajes cuando se trata de uso doméstico, industrial o agrícola. El primero representa un 12 % del total de extracción anual en el mundo; el industrial un 16 %; y el agrícola un 72 %. En el caso de México, los

porcentajes son 15 %, 10 %, y 76 %, respectivamente (Banco Mundial, 2018). Los números anteriores dejan claro que el cuidado del agua debe priorizarse en un consumo responsable y eficiente en la agroindustria.

Debido al ritmo de consumo y contaminación del recurso, se estableció el concepto de “Día cero” que se refiere al momento en el que el agua dulce será racionada (Breña Naranjo, 2022). Las prácticas actuales pronostican dicha fecha en no más de algunas décadas. Sin embargo, no se establecen datos precisos y el lapso podría variar si se toma consciencia, como fue el caso de Ciudad del Cabo, Sudáfrica, cuyo día cero estaba pronosticado para el 2018 pero fue retrasado indefinidamente al tomar las acciones necesarias (Elizondo, 2021).

5.3. Humedales

5.3.1. Definición e importancia

Los humedales son "*extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros*" (Ramsar, 2016).

La Convención Sobre los Humedales (Ramsar) los clasifica en 6 grupos principales:

1. Marinos (humedales costeros, lagunas costeras, costas rocosas, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral);
2. Estuarinos (deltas, marismas de marea y manglares);

3. Lacustres (humedales asociados con lagos);
4. Ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos);
5. Palustres (marismas, pantanos y ciénagas);
6. Artificiales (estanques de cría de peces y camarones, tierras agrícolas de regadío que incluyen arrozales, depresiones inundadas salinas, represas, embalses, estanques de grava, piletas de tratamiento de aguas residuales y canales).

Sin embargo, de manera más detallada y bajo criterios más específicos, se adoptó el “Sistema Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales”, publicado en el Manual de la Convención de Ramsar (2016), que incluye 42 tipos ubicados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales, y humedales artificiales.

Humedales marinos y costeros

Como su nombre lo indica, se trata de humedales ubicados en zonas costeras o marinas de poca profundidad. Esta categoría abarca los siguientes doce tipos de humedales:

- *Aguas marinas someras y permanentes*. Ejemplo: bahías y estrechos
- *Lechos marinos submareales*. Ejemplo: praderas de algas y praderas marinas mixtas tropicales.
- *Arrecifes de coral*
- *Costas marinas rocosas*. Ejemplo: Islotes rocosos y acantilados.
- *Playas de arena o de guijarros*. Ejemplo: puntas e islotes de arena
- *Estuarios*

- *Bajos intermareales de lodo, arena o con suelos salinos*
- *Pantanos y esteros.* Ejemplo: marismas y zonas inundadas por agua salada.
- *Humedales intermareales arbolados.* Ejemplo: manglares y pantanos de "nipa".
- *Lagunas costeras salobres/saladas.*
- *Lagunas costeras de agua dulce.*
- *Sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos marinos y costeros*

Humedales continentales

Se trata de los humedales que se encuentran lejos de las zonas costeras y marinas, es decir, "dentro" de los continentes. Esta categoría incluye veinte tipos de humedales, mencionados a continuación:

- *Deltas interiores permanentes*
- *Ríos/arroyos permanentes.* Este grupo incluye cascadas y cataratas
- *Ríos/arroyos estacionales/intermitentes/irregulares*
- *Lagos permanentes de agua dulce*
- *Lagos estacionales/intermitentes de agua dulce*
- *Lagos permanentes salinos/salobres/alcalinos*
- *Lagos y zonas inundadas estacionales/intermitentes salinos/ salobres/alcalinos*
- *Pantanos/esteros/charcas permanentes salinas/salobres/alcalinas*
- *Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes salinas/salobres/alcalinas*

- *Pantanos/esteros/charcas permanentes de agua dulce.* En este caso debe incluir vegetación emergente en agua por lo menos durante la mayor parte del periodo de crecimiento.
- *Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos.* Ejemplo: depresiones inundadas y praderas inundadas estacionalmente.
- *Turberas no arboladas.* Ejemplo: turberas arbustivas y turberas de carrizo.
- *Humedales alpinos/de montaña.* Ejemplo: praderas alpinas y aguas estacionales ocasionadas por el deshielo
- *Humedales de la tundra.*
- *Pantanos con vegetación arbustiva.*
- *Humedales boscosos de agua dulce.*
- *Turberas arboladas.*
- *Manantiales de agua dulce, oasis.*
- *Humedales geotérmicos*
- *Sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos continentales*

Humedales artificiales

Por último, se tienen diez tipos de humedales artificiales, dando un resultado final de cuarenta y dos tipos de humedales mencionados anteriormente.

1. *Estanques de acuicultura.*

2. *Estanques artificiales.* Diferiendo este del anterior de acuerdo a que su uso no se limita a la acuicultura.
3. *Tierras de regadío.*
4. *Tierras agrícolas inundadas estacionalmente.*
5. *Zonas de explotación de sal.*
6. *áreas de almacenamiento de agua.*
7. *Excavaciones.*
8. *Áreas de tratamiento de aguas.*
9. *Canales de transportación y de drenaje.*
10. *Sistemas kársticos y otros sistemas hídricos subterráneos artificiales.*

Debido a la variabilidad en las definiciones de lo que se considera un humedal, no se sabe con exactitud la superficie que abarcan mundialmente y, por lo tanto, no se sabe el porcentaje que representan. Las estimaciones del Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación del PNUMA indican un porcentaje del 6 % de la superficie global, lo que equivale a 570 millones de hectáreas (Ramsar, 2016). Por otro lado, según las investigaciones de Mitsch y Gosselink publicadas en su libro “Wetlands” (2015) el porcentaje representativo de humedales en el mundo es aproximadamente 5 %.

Estos ambientes, al desarrollarse en condiciones tan variables, albergan un gran conjunto de ecosistemas establecidos en agua dulce, salobre, salina e hipersalina (Landgrave & Moreno-Casasola, 2011) que, a su vez, representan una alta biodiversidad y, por tanto, productividad.

La importancia de los humedales puede verse desde tres puntos de vista: ecológico, económico y sociocultural. Desde el punto de vista ecológico, los servicios ecosistémicos que brindan son los siguientes:

- Fuente de recursos naturales.

Además de proveer agua para sus distintos usos, los humedales son fuente de una gran variedad de especies animales y vegetales utilizados como alimento para el ser humano, además de mantener un equilibrio ecológico óptimo (Lopez Portillo et al., 2010).

- Hábitat clave.

Como se ha recalcado anteriormente, los humedales albergan una gran biodiversidad de plantas y animales. Sus características permiten el desarrollo de las especies de distintas maneras, ya sea su uso permanente o temporal. Existen, por ejemplo, algunas especies migratorias que utilizan los humedales para su reproducción, descanso o alimentación (Hodgson, 1999).

- Preservación de procesos naturales.

Los humedales contribuyen a mantener procesos como la reproducción -y, por tanto, preservación- y/o migración de la vida silvestre; también mantienen procesos geomorfológicos o geológicos como depósito de sedimento, erosión, formación de bancos de arena, reestructuración de cursos de ríos y formación del suelo (Hodgson, 1999).

- Retención de sedimentos.

La profundidad de las aguas, así como el tipo de especies vegetales presentes en los humedales, provocan que el flujo de agua se reduzca y que se retengan los sedimentos.

Esto es muy importante para la salud ambiental debido a que permite que los procesos de remoción de tóxicos puedan llevarse a cabo de manera más eficaz (Rogers, 2005).

- Separación de agua salada.

Las aguas dulces, debido a su menor peso, frecuentemente se sobreponen a las aguas saladas (más pesadas que el agua dulce) que están a un nivel inferior (Hodgson, 1999). Esto es importante no sólo para el consumo de agua, sino para mantener el equilibrio ecológico y el bienestar de las especies presentes.

Ahora bien, es importante señalar también los beneficios económicos:

- Fuente de recursos naturales.

Este punto se repite en la clasificación de servicios económicos debido al aprovechamiento que se puede tener de algunas especies, esto va desde la pesca hasta la recolección de especies vegetales para su uso como materia prima en distintos procesos, así como su comercialización, así como la agricultura y, en algunos casos, el pastoreo. Además de ser fuente de agua utilizada para la ganadería e industria (Ramsar, 2015).

- Producción de energía.

Las características hidrológicas de los humedales pueden permitir la implementación de centrales hidroeléctricas; las especies vegetales pueden utilizarse para obtener leña y los sedimentos proveer turba (Gardner Finlayson, 2018). Sin embargo, a pesar de que el potencial de explotación de los humedales para su uso como fuente de energía es alto, es poco recomendable en cuestión de la conservación del recurso y es que los impactos ambientales (tales como pérdida de biodiversidad, disminución del nivel de

agua promedio, contaminación, entre otros) pueden llegar a ser irreversibles y más costosos que el beneficio de la energía (Ramsar, 2016).

- Turismo.

Los humedales, por sus características estéticas y de biodiversidad, son -o pueden llegar a ser- atractivos turísticos y de recreación que, idealmente, impulsen la economía local (Orgaz, 2015).

En aspectos socioculturales, la importancia de los humedales puede verse desde los siguientes puntos:

- Control de inundaciones

Para las comunidades establecidas cerca de cuerpos de agua, los humedales pueden retener el exceso de agua en temporada de lluvias cuando crecen los ríos, esto mediante su capacidad de reducir la velocidad de flujo, así como su capacidad de retención (Hodgson, 1999).

- Protección contra tsunamis y huracanes.

Esto porque tanto la vegetación como la estructura en general de los humedales costeros disminuyen la fuerza de las olas lo que frena el avance del oleaje, además de servir como barrera contra el viento (Hodgson, 1999).

- Importancia cultural.

La importancia cultural de los humedales puede depender tanto de las actividades económicas que se lleven a cabo, como de los rituales y significancia religiosa, y/o el valor histórico de los mismos (Mitsch et al., 2015).

5.3.2. Especies invasoras y pérdida de biodiversidad

Una especie se considera como introducida (exótica) cuando ha sido, intencionalmente o no, transportada por el hombre a un área fuera de su rango de distribución geográfica natural; y como una especie invasora, cuando la misma, una vez introducida puede expandir su población (o rango de distribución) en la nueva situación geográfica sin necesidad de la intervención humana y cuya presencia y distribución tiene un impacto negativo para la biocenosis (Kalesnik. & Malvarez, 2019).

La introducción de especies exóticas muchas veces tiene ventajas económicas como el comercio de mascotas o plantas de ornato, pero también en la silvicultura, ganadería, agricultura o la piscicultura e incluso en el control biológico o como barreras naturales de protección contra fenómenos naturales. Sin embargo, cuando estas especies toman la característica de “invasoras”, los efectos en la biodiversidad son catastróficos, esto debido a que las especies introducidas acaparan los recursos e impiden la reproducción y desarrollo de las especies autóctonas. Se calcula que desde el siglo XVII, las especies exóticas invasoras han contribuido en aproximadamente el 40 % de todas las extinciones de animales de las cuales se conoce la causa (Zolla & Márquez, 2018). Esto hace que la introducción de especies exóticas sea la segunda causa a nivel global de pérdida de biodiversidad, después la pérdida de hábitat (CONANP, 2012).

El desequilibrio ecológico provocado por tales especies desencadena en una serie de problemas no sólo biológicos, sino también económicos y de salud. Las consecuencias económicas están en los efectos que tienen las especies invasoras en la productividad, pero también en el costo gubernamental que se requiere para erradicarlas o controlarlas, siendo éste un costo ambiental mundial de aproximadamente un billón de dólares al año (CONANP, 2012). En México no existen estudios ni reportes suficientes que estimen las consecuencias y gastos nacionales provocados por especies invasoras, sin embargo se tienen algunos datos específicos como la evaluación de costos asociados a los daños causados por

la introducción de los peces loricáridos o plecos a la presa Infiernillo, en el límite entre Michoacán y Guerrero, que llevó a pérdidas económicas estimadas en más de 13 millones de dólares o lo invertido en la campaña contra la palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*) entre 2002 y 2009, que asciende a unos 5 millones de dólares (CONANP, 2012).

En caso de los humedales se convierte en un caso de importancia mayor para el control de especies invasoras debido a su vulnerabilidad a la invasión. Al tratarse de un ecosistema relativamente estático, acumula una gran cantidad de sedimentos y nutrientes, esto, sumado a la disposición presente de agua, convierte a los humedales en nichos de propagación de especies oportunistas, permitiéndoles su fácil reproducción y desarrollo. Tal es la susceptibilidad de invasión que se estima que el 24 % de las plantas más invasivas son especies de humedales, esto a pesar de que los humedales representan menos del 6 % de la superficie terrestre (Zedler & Kercher, 2004).

Las consecuencias de la invasión de especies en humedales repercuten no sólo a nivel ecológico, sino también en la economía y la salud. Centrándonos en las consecuencias ecológicas, podemos mencionar el desplazamiento de las especies nativas, y la disminución de oxígeno disuelto en el agua provocado por el crecimiento poblacional de la especie invasora, lo que desemboca en la muerte de especies acuáticas. Ambos ejemplos traen consigo pérdida de biodiversidad y, por tanto, desequilibrio ecológico (Zedler & Kercher, 2004).

Las consecuencias en la salud han sido más ampliamente estudiadas. En América Latina, el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) creó la Red Temática INVAWET, en la cual distintos científicos de América Latina, España y El Caribe exponen las situaciones locales relacionadas con la calidad del agua y el desarrollo de vectores de enfermedades provocadas por especies invasoras en humedales. De manera general, se puede decir que la invasión de especies en estos ecosistemas potencializa el desarrollo de enfermedades al propiciar el desarrollo de vectores como los mosquitos, o al favorecer la persistencia de bacterias patógenas (Bécares, 2019).

En cuanto a las consecuencias económicas, éstas se pueden observar en las pérdidas de agua (ya sea por evapotranspiración o por su contaminación que la hace poco aprovechable para su uso), el impedimento para el desarrollo de actividades como la pesca o el turismo, la obstrucción en las tomas de riego para la agricultura, entre otros (Meave del Castillo, 2014).

5.3.3. El caso de la Mintzita en Morelia, Michoacán

La Mintzita es un manantial ubicado en el suroeste del municipio de Morelia, Michoacán. Sus coordenadas externas son $n 19^{\circ} 37' 39.4'' - 19^{\circ} 40' 1.4''$ de latitud Norte y $101^{\circ} 15' 22.2'' - 101^{\circ} 17' 00''$ de longitud Oeste, comprendiendo un total de 419.6 hectáreas (Marín Togo & Blanco García, 2009). Este cuerpo de agua forma parte de la subcuenca del Lago De Cuitzeo (de la cuenca Lerma-Chapala).

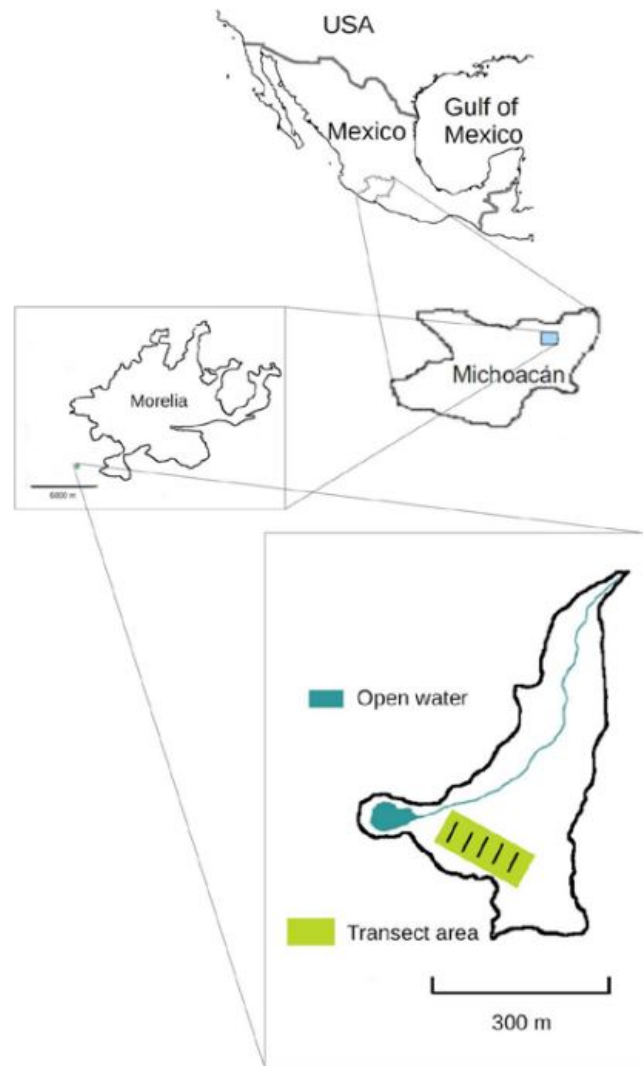


Figura 5.2: Rodríguez-Arias et al., (2018). *Ubicación de la Mintzita*

La importancia de la Mintzita radica en que proporciona más del 33% del agua para consumo en la ciudad de Morelia, esto es 1041.11 l/s (Marín Togo & Blanco García, 2009), convirtiéndose en el segundo manantial más importante para el estado de Michoacán.

El humedal formado por este manantial es también de gran importancia en términos de biodiversidad, al incluir flora acuática flotante, sumergida y de hidrófitas emergentes,

así mismo representa una importante zona de refugio y anidación de aves y peces.

En el año 2005 se declaró Área Natural Protegida la totalidad del polígono (419.6 hectáreas) en la categoría de Zona Sujeta a Preservación Ecológica (Hernández, 2005). En el 2009 56.8 hectáreas de las 419.6 fueron declaradas sitio Ramsar, esta extensión se conforma por la zona del manantial, el espejo de agua, el área de vegetación subacuática y una porción de vegetación terrestre donde se ubican algunas especies arbóreas de distribución restringida, excluyendo tierras de cultivo y asentamientos irregulares (Marín Togo & Blanco García, 2009).

Su declaración como sitio Ramsar se sustenta en los criterios 2 y 7: “sustenta especies vulnerables, en peligro o en peligro crítico o comunidades ecológicas amenazadas” y “sustenta una proporción significativa de las subespecies, especies o familias de peces autóctonas, etapas del ciclo biológico, interacciones de especies y/o poblaciones que son representativas de los beneficios y/o los valores de los humedales y contribuye de esa manera a la diversidad biológica del mundo”, respectivamente (Ramsar, 2016).

En cuanto al criterio 2, las siguientes especies: Peces de la familia Goodeidae: *Zoogoneticus quitzeoensis* y *Skiffia lermae*, están consideradas en la categoría de especies amenazadas. Las especies de aves *Anas platyrhynchos diazi* y *Bubo virginianus* se consideran amenazadas, además *Buteo jamaicensis* y *Regulus calendula*, se encuentran catalogadas en peligro de extinción y 16 especies se encuentran en la categoría de Protección especial (Marín Togo & Blanco García, 2009).

Sobre el criterio 7 algunas de las especies de peces presentes en la zona, son: *Scartomyzon austrinum* (nativa), *Oreochromis niloticus* (exótica), *Cyprinus Carpio* (exótica), *Hybopsis calientis* (nativa), *Yuriria alta* (nativa), *Poecilia reticulata* (exótica), *Poeciliopsis infans* (nativa), *Xiphophorus helleri* (exótica) y *Algansea tincella* (nativa). Las especies de la familia Goodeidae que se han registrado en La Mintiza pertenecen a la subfamilia Goodeinae que es endémica de México, de ahí radica la importancia de la conservación de este humedal, mismo que cuenta con cinco especies únicas de la ictiofauna dulceacuícola

del mundo, estas son: *Allophorus robustus*, *Goodea atripinnis*, *Xenotoca variata*, *Skiffia lermæ* y *Zoogonecticus quitzeoensis*, las dos últimas especies están consideradas como amenazadas por la legislación mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001. (Marín Togo & Blanco García, 2009).

La Mintzita presenta problemas de invasión de especies, teniendo una vegetación dominante de tule (*Typha domingensis*), carrizo (*Phragmites australis*) y sauce llorón (*Salix bonplandiana*) (Escutia-Lara et al., 2009). La invasión de especies en este humedal compromete la diversidad ecológica del mismo, provocando un desequilibrio ecológico que afecta en la calidad de los servicios que brinda este cuerpo de agua tan importante para el estado de Michoacán.

5.4. Carrizo



Figura 5.3: *Dibujo representativo del carrizo.* Elaboración propia

5.4.1. Definición y características

El carrizo (*Phragmites australis*) es una planta estolonífera rizomatosa de estación cálida que se propaga fácilmente por medio de estolones, rizomas y fragmentos de tallos (Escutia-Lara et al., 2012; Bart & Hartman, 2003) y crece de dos a cuatro metros de altura, con limbos foliares lisos y planos, de 1 a 5 cm de ancho y 15 a 45 cm de largo. Es una especie vegetal de estación cálida que se propaga fácilmente. Se encuentra en abundancia en suelos con altas concentraciones de agua como humedales y drenajes, aunque puede desarrollarse en otras regiones, teniendo una amplia distribución geográfica abarcando desde zonas templadas a tropicales (Gerritsen et al., 2009). Es considerada una especie altamente invasiva en gran parte del mundo, en el caso de México su presencia es abundante en los estados de Chihuahua, Jalisco y Michoacán.

Esta especie, como se mencionó anteriormente, se propaga fácilmente. Su establecimiento en un ecosistema afecta el resto de las especies acaparando los espacios, lo que provoca un desplazamiento de las especies nativas y una degradación de la vida silvestre. (Swearingen & Saltonstal, 2010).

Su propagación es a través de semillas que se dispersan por viento y/o agua a través del movimiento de sus rizomas. Una sola planta de carrizo produce cientos de miles de semillas por año (Swearingen & Saltonstal, 2010), es decir, se trata de una especie muy fértil y de fácil desarrollo.

5.4.2. Catálogo de usos

Debido a su abundancia, se le han otorgado diversos usos. Éstos se pueden clasificar en: medicinales, alimenticios, industria y construcción, y elaboración de objetos varios.


Usos del carrizo (<i>Phragmites australis</i>)			
MEDICINALES	GASTRONÓMICOS	INDUSTRIA/ CONSTRUCCIÓN	OBJETOS VARIOS
<p>Eliminar impurezas de cortaduras o heridas de la piel:</p> <p><i>El rizoma cuenta con sustancias adherentes que utilizan de manera tópica</i></p>	<p>Aderezo para ensaladas:</p> <p><i>Se utilizan únicamente los brotes tiernos</i></p>	<p>Extracción de celulosa para la industria papelera.</p>	<p>Confeccionar canastas, pajareras, petates.</p>
<p>Desinflamar edemas e hinchazones:</p> <p><i>El rizoma presenta propiedades antiinflamatorias.</i></p>	<p>Elaboración de sopas, atoles y bebidas:</p> <p><i>De sus semillas se obtiene una harina que se emplea como complemento para la elaboración de estos productos</i></p>	<p>Cobertura para techos o paredes.</p>	<p>Elaboración de artesanías</p>
<p>Controlar náuseas y vómitos, así como tratamiento contra trastornos urinarios:</p> <p><i>Mediante el cocimiento de hojas y brotes tiernos</i></p>	<p>Forraje para el ganado</p>	<p>Tinte de telas en tonos verdes o amarillos</p>	<p>Elaboración de flautas, armónicas y provisiones para instrumentos musicales.</p>
	<p>Barreras rompeviento en parcelas</p>	<p>Mallado en la construcción de casas de adobe.</p>	

Figura 5.4: Usos del carrizo. Elaboración propia

5.4.3. Plan de manejo en humedales

La invasión por parte del carrizo ha traído consigo consecuencias ambientales y socioeconómicas importantes, por lo que se ha buscado controlar la propagación de dicha especie.

El manejo se lleva a cabo comúnmente mediante el uso de herbicidas como el glifosato, sin embargo, se ha demostrado que el uso de este producto es nocivo para el ambiente y la salud. Los cultivos transgénicos tolerantes al glifosato generan encefalopatías, autismo, parkinsonismo, malformaciones y diversos tipos de cáncer, además de afectar los sistemas endocrino, reproductivo, inmunitario, digestivo, hepático, renal, nervioso y cardiovascular de las personas. Así como afectaciones en distintos tipos de fauna, incluidos polinizadores (SEMARNAT, 2020).

Algunas técnicas de manejo que se han propuesto pero que han sido muy poco exitosas son: la excavación, el enlonamiento, el pastoreo o el corte de semillas. La excavación consiste en la remoción de las plantas de carrizo desde la raíz, lo cual implica un mayor costo económico y energético para el uso de maquinaria adecuada; el enlonamiento es el uso de plásticos negros para cubrir las plantas y evitar que entre la luz para que no produzcan energía y así perezcan. Esta técnica tampoco es muy recomendada a grandes escalas debido a que se requeriría una gran superficie de material para cubrir la especie en cuestión sin afectar a las demás; por su parte, el pastoreo consiste en utilizar ganado para que consuman el carrizo, sin embargo, este método no puede ser utilizado en sitios de difícil acceso para los animales, además de que el pastoreo trae consigo consecuencias poco deseadas como lo es la compactación del suelo; por último el corte de semillas se propuso para evitar la propagación pero resultó altamente laborioso y poco eficiente (Nichols, 2020).

Un plan de manejo interesante es la cosecha del carrizo. El corte de la planta implica eliminar sus elementos encargados de llevar a cabo la fotosíntesis y demuestra una disminución en el crecimiento de la invasión (Escutia-Lara et al., 2012). Este método resulta

conveniente también para el aprovechamiento eficaz del carrizo en sus diferentes usos.

5.5. Tule



Figura 5.5: *Dibujo representativo del tule.* Elaboración propia.

5.5.1. Definición y características

El tule (*Typha domingensis*) es una especie de la orden Typhaceae. Se trata de una planta tropical que se encuentra frecuentemente en cuerpos de agua dulce como estanques, lagunas, zanjas, humedales y canales de riego. Se considera una planta acuática, aunque emergente. Se distribuye preferentemente en regiones por debajo de los 1000 m.s.n.m, es decir, en zonas cálido-húmedas (CONABIO, 2009), aunque existen reportes de distribución a alturas mayores, esto hace de *Thypa* una especie con una amplia presencia mundial y en el país.

Sus hojas generalmente igualan o exceden la altura de las espigas. Son hojas laminosas de hasta 1.5m de largo y de 0.8 a 1.3cm de ancho con envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo.

Se trata de una especie que florece en primavera y fructifica a mediados de otoño. Cada espiga de tule cientos de miles de semillas, las cuales se dispersan eficientemente por el aire y germinan en suelos húmedos o bajo aguas poco profundas. Las plántulas forman clones rápidamente por medio de rizomas en la primera temporada y florecen en la segunda (FNA, 2003).

El tule es una especie nativa, pero puede comportarse como invasiva (CONABIO, 2009) como es el caso de los humedales como la Mintzita en Michoacán. Su reproducción y distribución es tan persistente que forma manchones monoespecíficos en sus zonas de establecimiento (Bansal et al., 2019), lo cual tiene consecuencias negativas tanto ecológicas como económicas. La invasión de tule implica la pérdida de biodiversidad (como en todos los casos de invasión de especies) y la disminución de la eficiencia en los canales de riego o los estanques de almacenamiento de agua (CONABIO, 2009).

5.5.2. Catálogo de usos

El tule puede ser utilizado en diversos sectores económicos, sin embargo, el más representativo en la zona de estudio (Michoacán, México) es para confección de artesanías, siendo esta la principal fuente de ingresos de la población local de La Mintzita. Sus usos se pueden clasificar en: alimentación, vivienda, culturales/económicos, y otros.

Usos del tule (<i>Typha domingensis</i>)			
ALIMENTACIÓN	VIVIENDA	CULTURALES/ ECONÓMICOS	OTROS
<p>Como fuente de carbohidratos:</p> <p><i>Los tallos de las flores jóvenes se pueden hervir o cocer al vapor</i></p>	<p>Material de calafateo</p> <p><i>Utilizando las hojas y las bases de las vainas.</i></p>	<p>Elaboración de artesanías:</p> <p><i>Las artesanías tienen un alto valor cultural y son fuente de ingresos.</i></p>	<p>Objetos varios:</p> <p><i>Antorchas: Sumergiendo la espiga en aceite de carbón.</i></p> <p><i>Cuerdas: Utilizando hojas plegadas y tejidas.</i></p>
<p>Como sustituto de harinas en repostería</p> <p><i>El polen se utiliza como sustituto o para mezclarlo con las harinas ya que confiere un color amarillo.</i></p>	<p>Materiales para el reposo:</p> <p><i>El tejido de las hojas permite hacer catres o fundas de sillones.</i></p>	<p>Fuente de energía:</p> <p><i>La biomasa se puede utilizar para la síntesis de biodiesel.</i></p>	<p>Restauración ambiental:</p> <p><i>Utilizando la especie en el tratamiento de aguas residuales.</i></p>
<p>En platillos varios:</p> <p><i>Los rizomas tienen un sabor dulce y pueden ser cocinados de varias maneras</i></p>	<p>Material de aislamiento:</p> <p><i>Utilizado en la construcción o en la elaboración de cunas.</i></p>	<p>Usos ceremoniales:</p> <p><i>Los pueblos originarios norteamericanos utilizan los tallos y el polen para ceremonias varias.</i></p>	<p>Material para botes o canoas:</p> <p><i>Aprovechando el aerénquima en los tallos que proporciona flotabilidad.</i></p>

Figura 5.6: Usos del tule. Elaboración propia

5.5.3. Plan de manejo en humedales

A pesar de su potencial de invasión y del daño que ocasiona la distribución incontrolada de tule, no existe en México un plan de manejo para esta especie. Sin embargo, presenta características similares al carrizo, por lo que se propone que el control del tule sea a través de la cosecha, lo que permitiría su aprovechamiento en la elaboración de artesanías y el mantenimiento de la economía local.

La cosecha de tule implica la reducción de biomasa de la especie, aumentando la entrada de luz al ecosistema invadido, así como el aumento de la biodiversidad al cabo de dos años de manejo (Lishawa et al., 2015). La reducción de la invasión de *Typha domingensis* tiene la ventaja, no solamente del aumento de biodiversidad en plantas nativas, sino también su aumento en otros organismos que promueven la salud del ecosistema.

5.6. Hidrogeles

5.6.1. Definición

Un hidrogel es el estado hidratado de un xerogel; el xerogel es un polímero -o copolímero- reticulado sólido y duro que es capaz de absorber una cierta cantidad de líquido. Cuando el líquido que absorbe el xerogel es agua, se denomina “hidrogel” (Karadağ et al., 2000).

Los hidrogeles son entonces materiales poliméricos reticulados hidrofílicos (Li & Chen, 2020) en forma de red tridimensional de origen natural o sintético, que se hinchan en contacto con el agua formando materiales blandos y elásticos, y que retienen una fracción significativa de la misma en su estructura sin disolverse (Aldana, 2012).

Son polímeros hidrabsorbentes que pertenecen al grupo genérico de sustancias conocidas como mejoradores o acondicionadores de suelo (del Campo et al., 2008), esto debido al uso que se le ha dado en el campo de la agricultura.

5.6.2. Características y propiedades

Los hidrogeles tienen una serie de características y propiedades de las cuales la capacidad de absorción y la biocompatibilidad son las más preciadas y utilizadas en los diferentes campos de la industria.

Características:

- *Carácter hidrófilo.* Como se ha mencionado anteriormente, los hidrogeles poseen un carácter hidrófilo. Esto se debe a que, en su estructura molecular, poseen grupos afines al agua



(Benítez et al., 2015). Es decir, debido a las fuerzas intermoleculares de Van der Waals y puentes de hidrógeno presentes en el hidrogel.

- *Insolubilidad.* Estos materiales son insolubles en agua gracias a que su estructura consiste en una red polimérica tridimensional (Sáez et al., 2003).
- *Consistencia.* Presentan una consistencia suave y elástica como resultado de la baja densidad de entrecruzamiento del polímero utilizado (Chatterji et al., 1990). A pesar de que existen diferentes tipos de hidrogeles con diferentes materias primas utilizadas, la consistencia se asemeja entre todos. Esto es porque una alta densidad

de entrecruzamientos, disminuye el volumen libre entre las cadenas del hidrogel y la misma no podrá ser expandida ni mantener una gran cantidad de agua (González et al., 2012).

- *Hinchamiento*. El hinchamiento es el aumento de tamaño del material como resultado visible de su capacidad de absorción de agua. El líquido penetrante se difunde a través de la red tridimensional del material. El hinchamiento de los hidrogeles implica movimientos segmentales de gran escala, que generan como respuesta una separación entre las cadenas de los hidrogeles que se va incrementando cada vez más con el hinchamiento, de manera que la penetración de las moléculas de agua dentro de las redes de un hidrogel es una función de la estructura de la red (González et al., 2012). Es decir, un incremento de grupos hidrófilos en la estructura favorece una mayor interacción del hidrogel con el agua (Benítez et al., 2015), siempre cuidando no exceder la densidad de entrecruzamientos deseada para mantener la consistencia óptima del material.

Propiedades:

- *Propiedades mecánicas*. De manera general, las propiedades mecánicas de los hidrogeles dependen de la cantidad de agente reticulante utilizado, el tipo de plastificador, el tipo de monómero (materia prima) y el tipo de tratamiento de postgelación (Chen & Park, 2000)
- *Resistencia mecánica*. Esta propiedad es importante para que el hidrogel pueda cumplir la función dada soportando la acción de fuerzas externas. La resistencia mecánica puede aumentarse al aumentar la cantidad de agente reticulante (Chen & Park, 2000). Sin embargo, es importante mantener la elasticidad del material manteniendo una densidad de entrecruzamiento que no lo vuelva rígido y, por tanto, quebradizo.

- *Biocompatibilidad.* Esta propiedad ha sido altamente estudiada y utilizada para aplicaciones médico-farmacéuticas y es que los hidrogeles, entre todos los biomateriales sintéticos, tienen la cantidad de agua y consistencia que más se asemeja a los tejidos vivos (Peppas et al., 2000).

5.6.3. Clasificación y usos

Los hidrogeles se pueden clasificar de cuatro maneras dependiendo del tema de interés a analizar: con base en la naturaleza de los grupos laterales, de acuerdo con sus características mecánicas y estructurales, dependiendo del método de preparación, con base en la estructura física de la red (Aldana, 2012; Peppas et al., 2000).

CLASIFICACIÓN DE LOS HIDROGELES			
Naturaleza de los grupos laterales	Método de preparación	Estructura física de la red	Naturaleza de las uniones de la red tridimensional
<u>Neutros</u> Cuando los grupos laterales no tienen comportamientos polares	<u>Homopolimérica</u> Cuando se utiliza un solo monómero para su síntesis	<u>Amorfos</u> Cuando las moléculas de la red están dispuestas aleatoriamente.	<u>Físicos</u> Cuando las uniones no son estables y son más débiles que las covalentes (Ejemplo: interacciones de Van der Waals)
<u>Iónicos</u> Cuando los grupos laterales están polarizados. Pueden ser aniónicos, catiónicos o alifáticos	<u>Copolimérica</u> Cuando se utilizan dos monómeros distintos para su síntesis	<u>Semicristalinos</u> Cuando la red tiene regiones amorfas y regiones cristalinas	<u>Químicos</u> Cuando las uniones son a través de enlaces covalentes.
	<u>Multipolimérica</u> Cuando se utilizan más de dos monómeros distintos para su síntesis	<u>Estructuras por enlaces de hidrógeno</u> Cuando la red forma puentes de hidrógeno.	
	<u>Polimérica interpenetrada</u> Cuando se utilizan redes poliméricas entrelazadas entre sí sin unirse covalentemente	<u>Agregados homocoloidales</u> Cuando biopolímeros forman parte de la red.	

Figura 5.7: Clasificación de los hidrogeles. Elaboración propia

Las principales aplicaciones de los hidrogeles se ven reflejadas en la agricultura y la medicina. En el caso del primero se aprovechan sus capacidades de absorber y retener agua

para hacer el riego más eficiente; en medicina se utilizan para el transporte y liberación de medicamentos a través del control de sus características bioadhesivas en presencia de fluidos biológicos, así como para el desarrollo de prótesis de tejidos blandos (Nascimento et al., 2018; Peppas et al., 2000). No obstante, existen algunas investigaciones que buscan aplicar estos materiales en áreas como remediación ambiental, veterinaria, industria alimenticia y tecnológica (Abdulhameed et al., 2020; Karadağ et al., 2000; Li & Chen, 2020).

En cuanto a la remediación ambiental, Abdulhameed et al. (2020) propone la síntesis de hidrogeles a partir de cáscara de arroz, caracterizándolos con espectroscopía de infrarrojos.

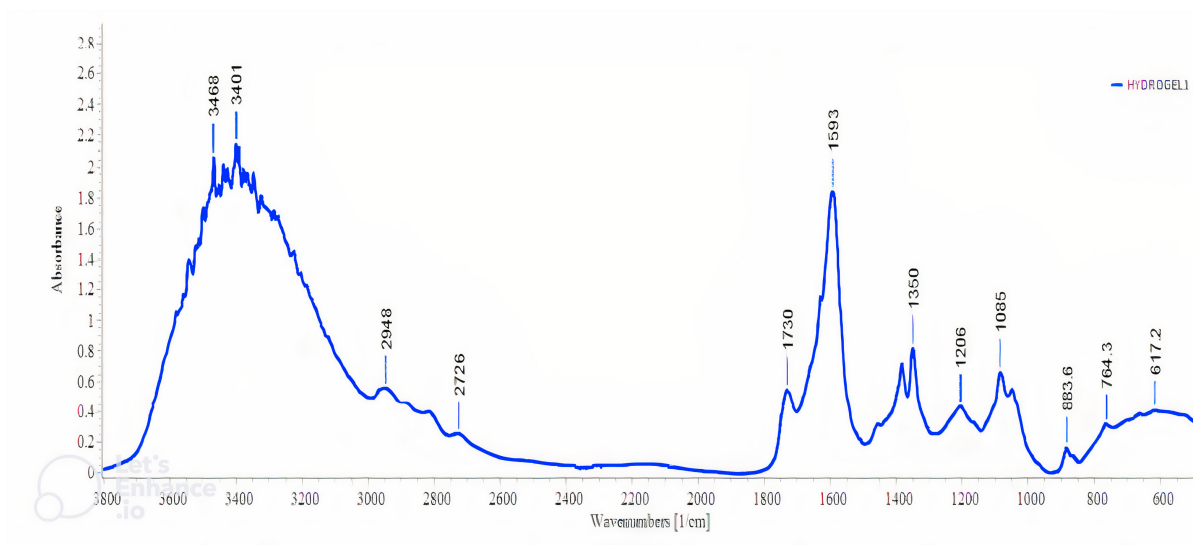


Figura 5.8: Espectroscopía IR del hidrogel de referencia. (Abdulhameed et al., 2020)

5.6.4. Síntesis convencional y sus consecuencias

Los hidrogeles convencionales se producen con acrilamida, compuesto que ha sido clasificado como "probable carcinógeno para los humanos" (clase 2A) por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), como cancerígeno en la categoría 2 de la Unión Europea, así como mutágeno en la categoría 2 y tóxico para la reproducción en la categoría 3 de la Unión Europea (Moreno Navarro et al., 2007).

En otras palabras: la síntesis convencional de los hidrogeles no siempre implica biocompatibilidad, lo cual implica un riesgo para la salud humana y ambiental, independientemente del uso que se le dé.

Capítulo 6

METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo durante el desarrollo de este proyecto se dividió en dos secciones:

1. La recolección y seroacación de las especies utilizadas.
2. La síntesis de los hidrogeles.

A su vez, la síntesis de los hidrogeles se dividió en cuatro secciones:

1. El secado y molido del tule y el carrizo con el fin de obtener un polvo fácil de manipular y someter a reacciones químicas.
2. La extracción de la celulosa a partir del polvo obtenido.
3. La síntesis de la carboximetilcelulosa (reactivo sustituyente de la acrilamida)
4. La síntesis final de los hidrogeles a partir de la carboximetilcelulosa.

6.1. Recolección y separación del carrizo y el tule

Se recolectó el carrizo y el tule del manantial de la Mintzita en Morelia, Michoacán, siendo especies presentes como plantas invasoras en dicho manantial, así como en los humedales del Lago de Cuitzeo, Michoacán. El método de recolección fue de tipo de corte para evitar someter a estrés a las especies nativas del humedal, de acuerdo con investigaciones previas acerca del carácter invasivo de dichas especies y su plan de manejo (Escutia-Lara et al., 2012).

Se separaron las muestras de carrizo en 2 tipos: con hojas y sin hojas. Esto con el fin de analizar la posible influencia de la clorofila en los hidrogeles.

6.2. Síntesis de los hidrogeles

6.2.1. Secado y molido de la materia prima

Una vez separadas las especies, se metieron al horno de secado durante 72 horas de tal manera que el contenido de humedad fuera mínimo para permitir el molido.

La molienda se llevó a cabo en un molino de cuchillas (Thomas Wiley, modelo T4276M) utilizando una criba del #20, obteniendo un polvo fino como el que se muestra a continuación:



Figura 6.1: *Polvo obtenido del molido del carrizo*



Figura 6.2: *Polvo obtenido del molido del tule*

6.2.2. Extracción de celulosa

Del polvo obtenido en el paso anterior se extrajo la celulosa (a partir de este momento, todos los pasos se hicieron paralelamente para el carrizo sin hojas, el carrizo con hojas y

el tule).

En primer lugar, se mezclaron 5g de la molienda con 100 mL de ácido acético glacial al 80% y 10 ml de ácido nítrico al 70%. Esta mezcla se colocó en una parrilla con agitación a 120°C y un nivel medio de agitación. Este procedimiento se llevó a cabo dentro de una campana de extracción debido al riesgo que representa la liberación de óxidos de nitrógeno.



Figura 6.3: A la izquierda: Reacción de extracción de celulosa del carrizo. A la derecha: Reacción de extracción de celulosa del Tule

Se tomaron registros sobre los cambios observados en las reacciones de cada muestra,

coincidiendo las tres en los tiempos y temperaturas aproximados de los cambios de color, emisión de óxidos de nitrógeno y fin de la reacción. Al inicio de la reacción, el color de las muestras era de un naranja-café oscuro el cual se va haciendo claro conforme pasa el tiempo.

Cuando la temperatura se encontraba entre los 75 y 80°C, aproximadamente después de 10 minutos de iniciada la reacción, se comenzaron a formar los óxidos de nitrógeno residuales, siendo muestra de esto la expulsión de gases oscuros anaranjados y el aclaramiento de las muestras.

A los 15 minutos, las reacciones alcanzaron temperaturas de entre 93 y 95°C, esto provocó un aumento en la cantidad de óxidos expulsados, emanando una gran cantidad de gases de color ocre. Este comportamiento se mantuvo durante 5 minutos, hasta que la reacción alcanzó una temperatura de 100°C, en ese momento la cantidad de óxidos expulsados comenzó a disminuir y el color de la reacción se tornaba amarillo-anaranjado.

Se alcanzó la máxima temperatura (105°C) transcurridos 55 minutos del inicio de la reacción. En ese punto, el color de las mezclas era amarillo y ya no se emitían gases. A partir de ese momento se mantuvo la temperatura y agitación durante 5 minutos y se detuvo la reacción.

La mezcla se dejó enfriar hasta 40°C, en ese momento se agregaron 60mL de agua destilada y se agitó durante 20 minutos para posteriormente filtrarla. Durante el filtrado se agregaron 5mL más de agua destilada y 5mL de etanol al 95 %.

Una vez filtrado, se obtuvo una pasta como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 6.4: *Celulosa húmeda*

El secado se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 20 horas, obteniendo la celulosa como se muestra a continuación:

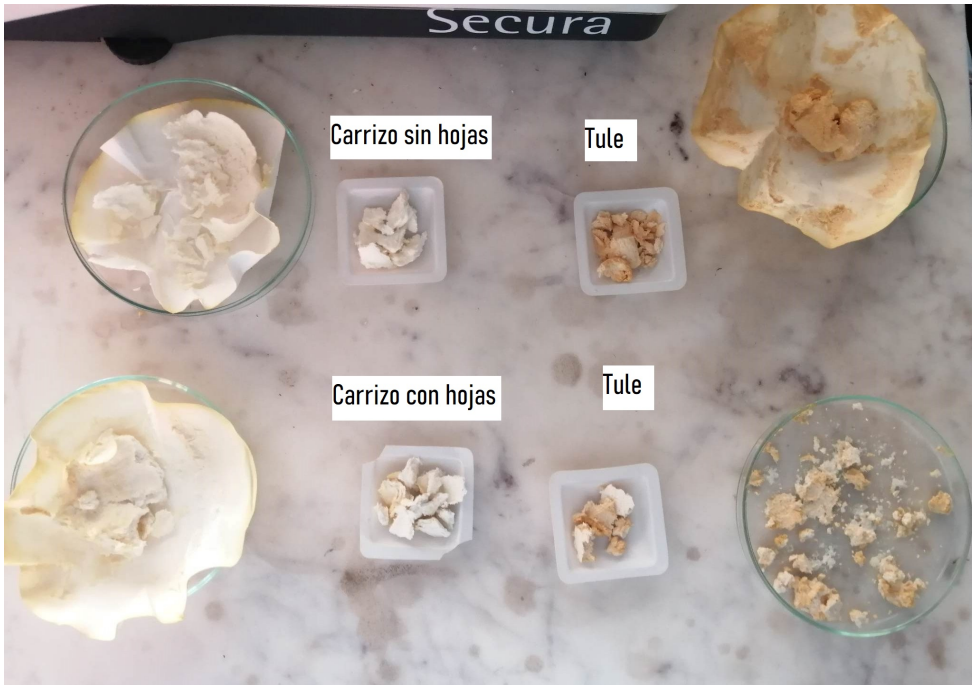


Figura 6.5: *Celulosa seca.*

Una vez seca, se hicieron los cálculos para obtener la eficiencia de las reacciones:

$$\%Rendimiento = \left(\frac{\text{Masa de celulosa obtenida}}{\text{Masa de materia prima}} \right) \times 100 \quad (6.1)$$

Dando como resultado, en promedio, una eficiencia del 52% para el carrizo (coincidiendo ambas muestras) y 42% para el tule.

6.2.3. Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC)

Para la síntesis de CMC se tomaron en cuenta los métodos reportados en tres artículos:

1. *Synthesis of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogel from Rice Husk Using a Microwave* de Adamu Abdulhameed, Harun M. Mbuvi y Evans O. Changamu.
2. *Optimización del proceso de carboximetilación de celulosa proveniente del bagazo de caña de azúcar* de Gamboni, Jimena E.; Sánchez, Juan M.; Slavutsky, Aníbal M.; y Bertuzzi, María A.
3. *Obtención de carboximetilcelulosa a partir de linter a algodón* de Elizabeth Terán y Ramiro Escalera.

Método 1

Este método se llevó a cabo siguiendo el proceso indicado en el artículo 1 de la lista anterior. Se mezclaron 5g de celulosa con 100 mL de agua destilada y se puso en una parrilla con agitación durante 1 hora a 25°C y agitación media, mientras se agregaban 10 mL de hidróxido de sodio al 30 % gota a gota.



Figura 6.6: *Reacción de carboxitilación por el Método 1*

Pasada la hora, se agregaron 5 g de ácido monocloroacético (AMCA) y se colocó en un microondas durante dos minutos con una potencia aproximada de 525 watts, en seguida se filtró la mezcla.

La neutralización se llevó a cabo mezclando el producto obtenido con 100 mL de metanol durante 24 horas y añadiendo ácido acético glacial y se filtró nuevamente.

Sin embargo, después del filtrado se obtuvo una pasta de textura similar a la celulosa, lo cual resultaba un mal indicador que podría significar una falla en la reacción, por lo que, una vez seca, se llevó una muestra a análisis por espectroscopía de infrarrojo (IR).

Los resultados de la caracterización indicaron que la reacción no se había llevado a cabo y seguía siendo celulosa. Por este motivo se intentó seguir otro método.

Método 2

Este método se llevó a cabo siguiendo el proceso indicado en el artículo 2 de la lista mencionada anteriormente.

Se mezclaron 3g de celulosa con 80 mL de isopropanol y se puso en agitación durante media hora. Transcurrido ese tiempo, se añadieron 10 mL de NaOH al 50 % con agitación alta durante 30 minutos a temperatura ambiente. Se añadió AMCA con relaciones a la celulosa de 1:6 y 1:2. El ácido fue añadido de manera paulatina durante un lapso de 30 minutos. La mezcla se mantuvo en agitación durante 3 horas y media a 60°C.

Una vez concluida la reacción anterior, se filtró la mezcla y se mezcló con 300mL de metanol al 70 %.

La neutralización se llevó a cabo con ácido acético al 90 % y se llevó a cabo un segundo lavado, esta vez con 15 mL de etanol. Finalmente se filtró y se secó.

Al igual que en el primer método, se pudo notar una textura y apariencia similar a la celulosa después de filtrar la mezcla por lo que decidimos llevar a análisis la muestra una vez secada. Los resultados (utilizando nuevamente espectroscopía IR) indicaron nuevamente que no se había llevado a cabo la reacción y que seguía siendo celulosa.

Método 3

Ante las fallas de los dos métodos anteriores, se buscó otra referencia. En esta ocasión se tomó como base el artículo 3 de la lista antes mencionada.

Se mezcló 1g de celulosa con 13 mL de isopropanol al 99.5 % y se puso en agitación media durante 15 minutos manteniendo una temperatura entre 10 y 12°C. Se agregaron 2mL de NaOH al 30 % y se agitó por una hora manteniendo las condiciones de agitación y temperatura.

Siguiendo con la agitación, se le agregó una mezcla de 0.886g de AMCA y 3.2 mL de

isopropanol al 99.5 %. A partir de ese momento se calentó la mezcla hasta 60°C durante tres horas, asegurando que la temperatura no aumentara más de 3°C/min. Transcurrido ese tiempo, se añadieron 13 mL de isopropanol al 87 %.

Para la neutralización se añadieron 0.2 mL de ácido acético al 90 %.

Una vez neutralizada la mezcla, se hicieron tres lavados; los primeros dos se llevaron a cabo utilizando etanol al 75 %, y el tercer lavado con etanol al 85 %.

Por último, se filtró y se secó al horno durante 3 horas y media a 60°C.

A pesar de que la apariencia era diferente a aquella de los métodos anteriores, se decidió volver a analizar las muestras por espectroscopía IR, obteniendo el mismo resultado que los dos anteriores.

Modificaciones a los métodos y propuesta de un nuevo método

Después de varios intentos y modificaciones en los distintos métodos, se logró obtener una ruta de síntesis exitosa (comprobada por análisis IR). Esta ruta tomó como base el método 3 con los siguientes cambios:

En la primera etapa se añadieron 2mL de NaOH al 30 % a la mezcla de celulosa e isopropanol.

Se añadieron 2mL de NaOH al 30 % a la mezcla de AMCA e isopropanol antes de añadir dicha mezcla a la reacción.

100 minutos después de añadir la mezcla de NaOH-AMCA-isopropanol a la reacción, se añadieron 15 mL de agua destilada para facilitar la agitación de la mezcla.

2 horas y 15 minutos después de añadir la mezcla de NaOH-AMCA-isopropanol a la reacción, se añadieron 5 mL de agua destilada para facilitar la agitación de la mezcla.

2 horas y 55 minutos después de añadir la mezcla de NaOH-AMCA-isopropanol a la

reacción, se añadieron 5 mL de agua destilada para facilitar la agitación de la mezcla.

El secado se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 15 horas para evitar el gasto energético innecesario del horno de secado.

Utilizando este procedimiento se obtuvieron, en promedio, 1.27g de CMC por cada gramo de celulosa en el caso del carrizo y de 1.21g de CMC por gramo de celulosa en el caso del tule.

Siendo que los resultados fueron iguales, tanto para el carrizo con hojas como para el carrizo sin hojas como para el carrizo con hojas, a partir de este momento se mezcló la celulosa de ambos para utilizarla como una misma.

6.2.4. Síntesis de los hidrogeles

Una vez obtenida con éxito la CMC, la síntesis de los hidrogeles resultó sencilla. Se llevó a cabo de dos maneras:

1. Con parrilla con agitación.

En este método se disolvieron 2g de CMC con 20ml de agua destilada. Se mantuvo en agitación alta durante una hora a 80°C. Posteriormente se añadieron 10 ml de etilenglicol, manteniendo las condiciones de agitación y temperatura durante 2 horas hasta la formación del hidrogel.

2. Con horno de microondas.

En este método también se utiliza la parrilla para disolver la CMC con agua destilada (utilizando en este caso únicamente 16 ml). La diferencia radicó en el uso del micro-

ondas siguiendo la metodología descrita por Abdulhameed et al. (2020) tras añadir el etilenglicol, este caso se llevó al microondas durante 5 minutos con potencia 3 (aproximadamente 600 watts)

El segundo método resultó mejor debido al menor uso de agua y al menor tiempo necesario para la obtención del hidrogel, haciendo el proceso más eficiente y, por ende, más sustentable.

En el caso del carrizo, se obtuvieron en promedio 3.6g de hidrogel por cada gramo de CMC. Para el tule fueron 3.2g de hidrogel por gramo de CMC.



Figura 6.7: A la izquierda: hidrogel de tule. A la derecha: hidrogel de carrizo

6.2.5. Resumen del proceso completo

A continuación, se muestra el flujo de proceso para la síntesis del hidrogel:

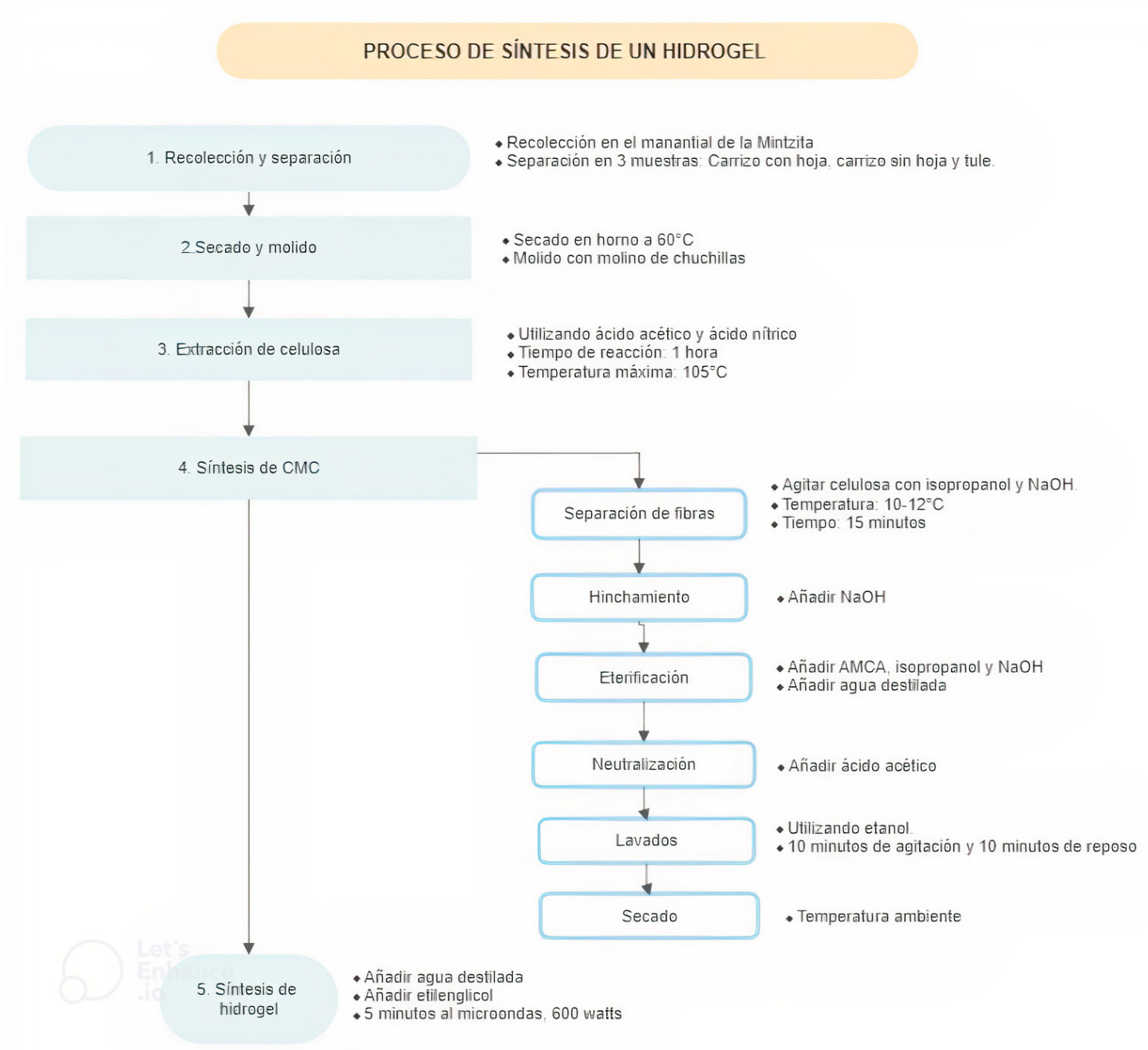


Figura 6.8: Proceso completo llevado a cabo para la síntesis de los hidrogeles de este trabajo

Capítulo 7

RESULTADOS

Los resultados se analizaron desde tres puntos de vista: la caracterización, las pruebas de hinchamiento y las pruebas de toxicidad. Siendo los tres aspectos de suma importancia para el uso que se espera darle al material sintetizado.

7.1. Pruebas de eficiencia

La eficiencia de los hidrogeles obtenidos se evaluó a partir de tres análisis:

1. La caracterización con el fin de demostrar que el producto obtenido es, en efecto, un hidrogel. Para lo cual se utilizó la espectroscopía IR.
2. Las pruebas de hinchamiento para comprobar la capacidad de absorción y retención de agua de los hidrogeles.
3. Las pruebas con bacterias con el fin de descartar algún comportamiento tóxico por parte del material.

7.1.1. Espectroscopía

Infrarrojo

Se hicieron análisis IR de la celulosa obtenida del carrizo y del tule, de la CMC y de los hidrogeles. A continuación se muestran los resultados:

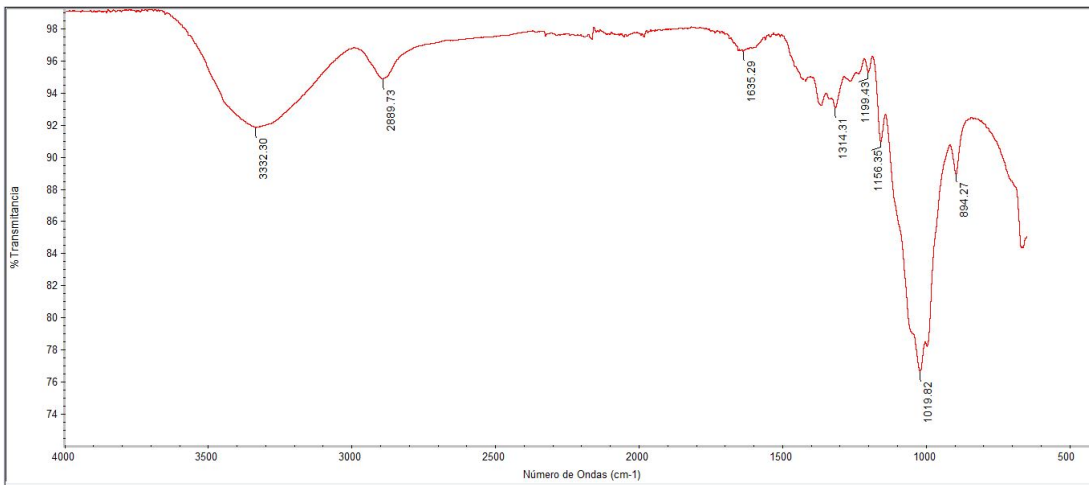


Figura 7.1: Espectroscopía IR de la celulosa obtenida del carrizo

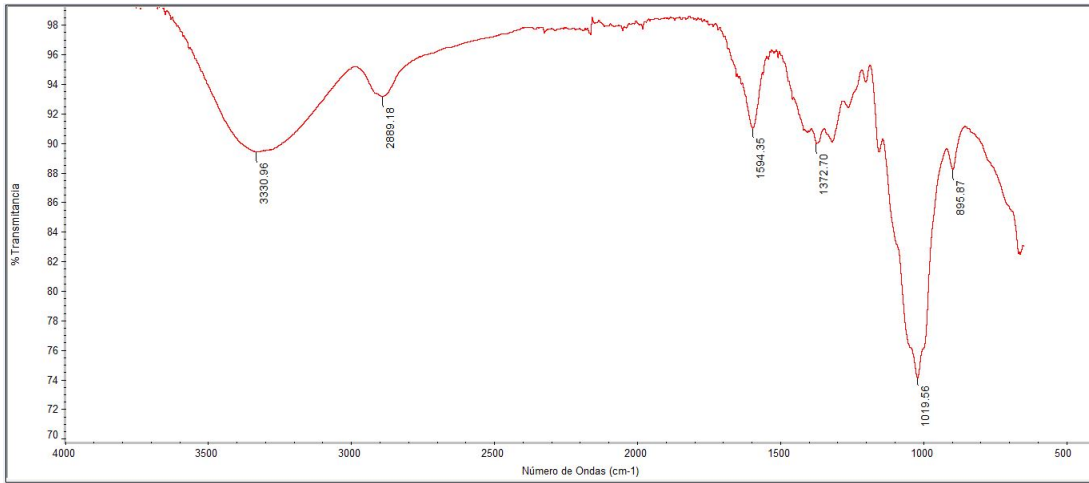


Figura 7.2: Espectroscopía IR de la celulosa obtenida del tule

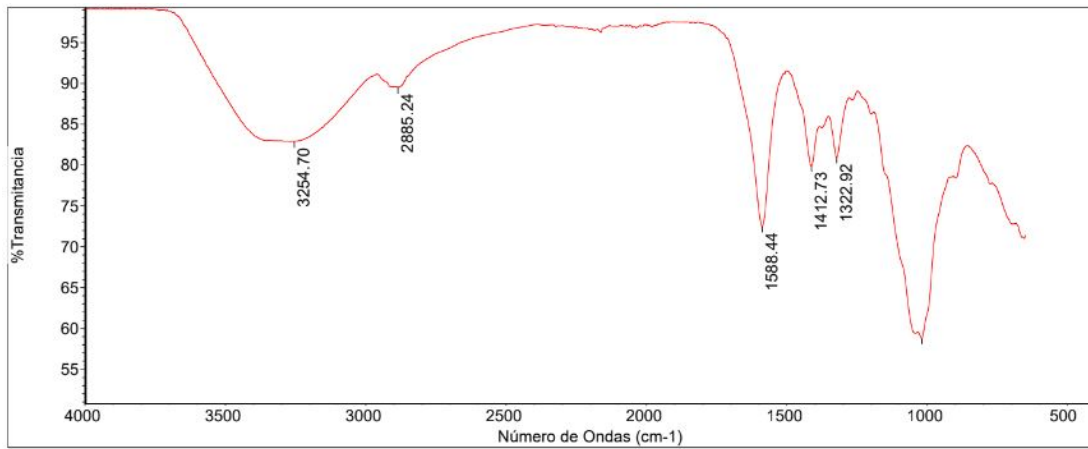


Figura 7.3: Espectroscopía IR de la CMC obtenida del carrizo

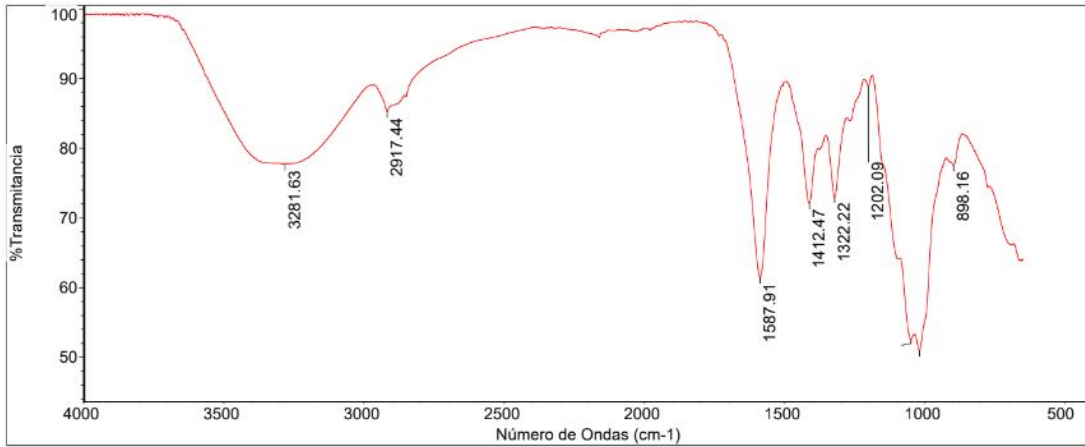


Figura 7.4: Espectroscopía IR de la CMC obtenida del tulle

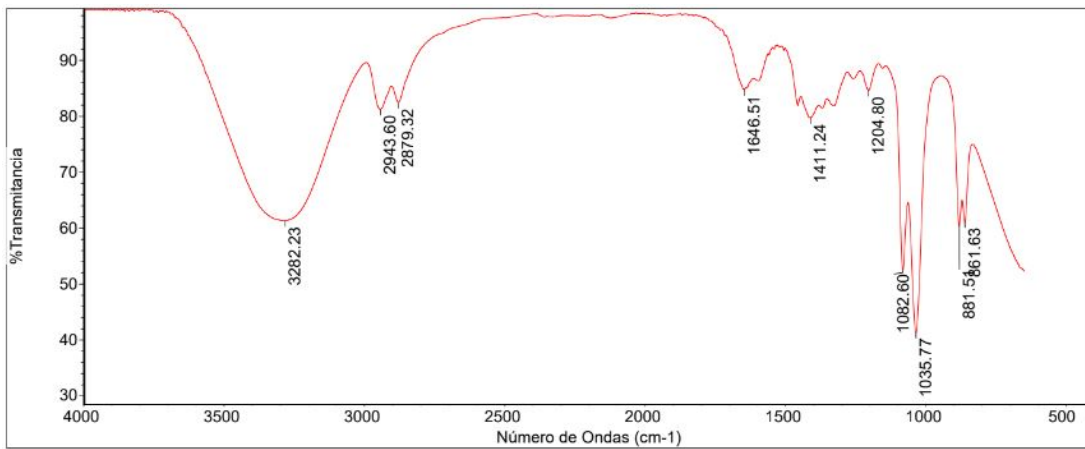


Figura 7.5: Espectroscopía IR del hidrogel obtenido del carrizo

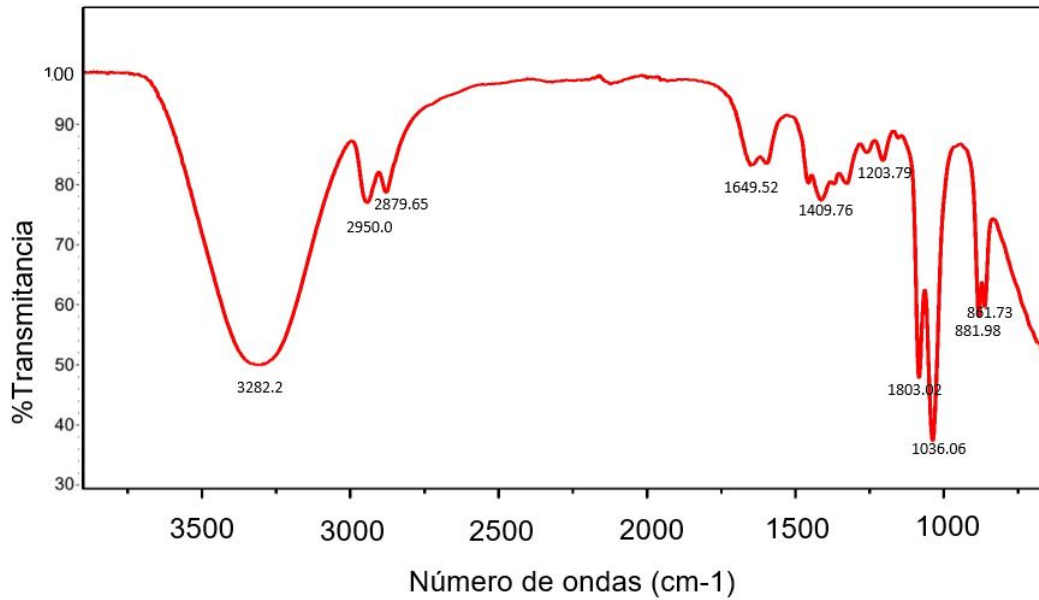


Figura 7.6: *Espectroscopía IR del hidrogel obtenido del tule*

7.1.2. Pruebas de hinchamiento

Para estas pruebas, primero se secó el hidrogel durante 5 días en el horno de secado a 70°C.

Después del secado se midió la densidad de los hidrogeles para pesar la masa equivalente a 1ml de hidrogel. A cada muestra se le irrigó agua de manera paulatina hasta que superó su capacidad de absorción.

Los resultados arrojaron, en promedio, una capacidad de absorción de 5ml de agua por mililitro de hidrogel para el carrizo; y 4ml de agua por mililitro de hidrogel para el carrizo.

7.1.3. Pruebas de toxicidad con bacterias

Para llevar a cabo estas pruebas se prepararon cuatro muestras de hidrogel:

1. Tule estéril.
2. Tule no estéril.
3. Carrizo estéril.
4. Carrizo no estéril.

La esterilización se llevó a cabo en autoclave, lo que también demostró la capacidad de los hidrogeles a soportar altas presiones y temperaturas.

Se utilizó la bacteria *Herbaspirillum huttiense* y se puso en interacción con los hidrogeles en agar nutritivo durante 72 horas en incubadora a 30-35°C. Se tomó registro diario de la evolución en el crecimiento de la bacteria con el fin de detectar la formación de un halo alrededor del hidrogel (indicador de toxicidad). Como control se utilizó agua destilada estéril.

Posterior a las 72 horas se observó un crecimiento homogéneo de la bacteria en todos los casos. Es decir, en ningún caso el hidrogel inhibe el crecimiento bacteriano.

Por último, se hizo un conteo de colonias de *Herbaspirillum huttiense* formadas por cada mililitro en cada una de las muestras, arrojando los siguientes resultados:

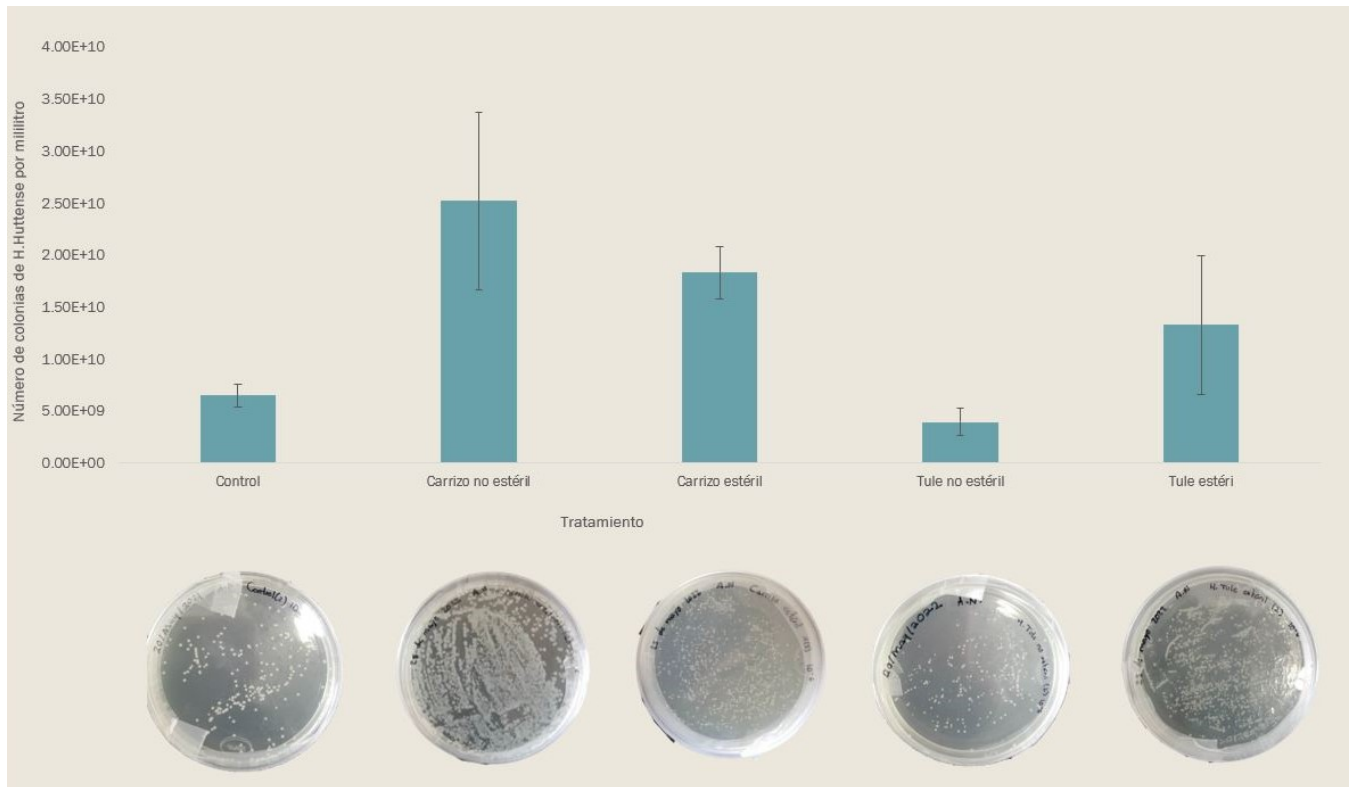


Figura 7.7: Colonias de bacterias por mililitro

Los datos arrojados en la figura anterior indican el crecimiento de la bacteria a pesar de la presencia de los hidrogeles, formando colonias que ocupan homogéneamente el espacio en el agar nutritivo (sin formar halos indicativos de toxicidad). Se puede notar que el mayor número de colonias de *Herbaspirillum huttense* fue en el caso de los hidrogeles de carrizo.

7.2. Análisis de datos

El análisis de los resultados obtenidos fue el siguiente:

1. Espectroscopía:

Las bandas observadas en el espectro IR de la celulosa fueron las siguientes (con valores aproximados):

- 3000cm^{-1} . Indica la formación de enlaces O-H (intra e intermoleculares).
- 2900cm^{-1} . Representa enlaces C-H.
- 1600cm^{-1} . Se debe a estiramientos del enlace H-O-H. Es una banda ancha representativa de residuos de agua en los compuestos.
- 1350cm^{-1} . Representa la vibración simétrica de enlaces CH_2
- 1100cm^{-1} . Representa uniones simples de tipo C-O-C.

En cuanto a las bandas observadas en el espectro de la CMC, se puede notar que se conservan picos similares a la celulosa, apareciendo una nueva banda cercana a los 1590cm^{-1} que confirma la presencia de enlaces COO^- .

Por último, en las gráficas de los hidrogeles se observa un nuevo pico en, aproximadamente 1650cm^{-1} que indica los enlaces éster formados entre la CMC y el etilenglicol.

De esta manera, la espectroscopía por IR comprobó la correcta formación del material en cada etapa: celulosa, CMC e hidrogel. Por lo que fue posible afirmar que los materiales obtenidos fueron, en efecto, hidrogeles a base de celulosa.

2. Hinchamiento:

Los hidrogeles obtenidos son capaces de aumentar su volumen hasta un 400 % para el caso de tule y 500 % para el caso del carrizo. Esto se traduce a que son capaces de retener una cantidad de agua significativa.

3. Pruebas con bacterias:

Estas pruebas sugieren que los hidrogeles son biodegradables, es decir, pueden ser consumidos por bacterias, lo cual los hace más sustentables.

4. Rendimiento

Es importante también recalcar el rendimiento total de la síntesis de los hidrogeles:

Para el carrizo, se obtuvieron 2.4g de hidrogel por cada gramo de carrizo seco molido, lo cual se traduce en 11.7ml de agua absorbidos por cada gramo de carrizo.

En el caso del tule, se obtuvieron 1.6g de hidrogel por cada gramo de tule seco molido, lo cual se traduce en 6ml de agua absorbidos por cada gramo de tule.

Capítulo 8

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

8.1. Discusión

La síntesis del hidrogel puede ser analizada a partir de tres etapas: el rendimiento en la extracción de celulosa, los valores óptimos de tiempo y temperatura y el rendimiento en la síntesis de CMC. Por su parte, la eficiencia se puede analizar de tres maneras: la caracterización, la toxicidad y el hinchamiento.

Respecto a la extracción de celulosa, los rendimientos mostrados fueron de 52 % para el carrizo y de 42 % para el tule, siendo menores a los resultados reportados en la bibliografía que son de un 58 % (Gamboni et al., 2010). Sin embargo, es importante recalcar que las fuentes de celulosa son distintas; en este caso se utilizaron carrizo y tule, mientras que en el artículo de comparación se utilizó bagazo de caña de azúcar. No obstante, se debe mantener la disposición de desarrollar métodos que aumenten el rendimiento en la reacción de extracción de celulosa para hacer el proceso más eficiente.

Los valores óptimos de tiempo y temperatura mostraron resultados favorables con respecto a otras investigaciones; la reacción de extracción de celulosa se llevó a cabo durante una hora, alcanzando una temperatura máxima de 105°, mientras que en publicaciones

anteriores se reportaban tiempos de 4 horas (Gamboni et al., 2010) y temperaturas de 120° (Abdulhameed et al., 2020). Lo anterior se traduce en un menor gasto energético en el caso del método utilizado para la presente investigación. Durante el mismo proceso de extracción de celulosa, se tomó en cuenta también el secado; en este caso, el secado se hizo a temperatura ambiente a diferencia de otros métodos que implicaban el uso de un horno de secado o estufa (Abdulhameed et al., 2020; Gamboni et al., 2010). A pesar de que se esperaba un tiempo de secado mayor, los resultados mostraron que el tiempo necesario de secado consistía en 20 horas, en comparación a las 24 horas (Gamboni et al., 2010) y a las 19 horas (Abdulhameed et al., 2020) reportadas en la bibliografía, reiterando que se trata de un método más sustentable desde el punto de ahorro energético.

Por su parte, la síntesis de CMC coincidió en tiempo y temperaturas que el método reportado sobre el cual se basó la investigación (Terán & Escalera, 2007), por lo que, en esta parte del proceso, el ahorro energético se basó en el secado que nuevamente se llevó a cabo a temperatura ambiente. No obstante, dicho ahorro conllevó un aumento en el tiempo necesario para el proceso, siendo este de 15 horas, es decir: 12 horas más que las 3 horas reportadas en la bibliografía (Terán & Escalera, 2007).

En cuanto al rendimiento de CMC, los valores obtenidos coinciden a grandes rasgos con los reportados, siendo de 1.27 g de CMC por cada gramo de celulosa para el caso del carrizo y de 1.21 g de CMC por cada gramo de celulosa para el caso del tule, en comparación con los 1.3 g de CMC por cada gramo de celulosa de artículos anteriores (Saputra et al., 2014).

Respecto a la eficiencia del hidrogel, se debe comenzar por la caracterización del producto para poder comparar de manera correcta, es decir, para saber que se están comparando productos similares. Siendo que la espectroscopía utilizada para el análisis de la celulosa y la CMC fue llevada a cabo con el único objetivo de verificar la conclusión correcta de cada proceso, la comparación con otros métodos puede ser limitada al producto final, es decir: al hidrogel. Notamos que los resultados de la caracterización de los hidrogeles sintetizados en el presente trabajo coinciden con la espectroscopía del hidrogel de referencia

(Abdulhameed et al., 2020).

Por último, resulta difícil comparar resultados en cuanto a toxicidad e hinchamiento debido a que no están reportados en la literatura, las referencias utilizadas se limitaban al proceso de síntesis del hidrogel. Las comparaciones posibles son aquellas con un gel a base de acilamidas, siendo los resultados de hinchamiento mucho menores: de 4 a 5ml de agua por cada mililitro de hidrogel en el caso del hidrogel de CMC, en comparación con los 50ml de agua por cada mililitro de hidrogel de acrilamida (Rivera y Mesías, 2016). Sin embargo, la toxicidad es evidente en el caso de los geles de acrilamida.

Es importante señalar que las dos primeras gráficas miden la transmitancia, mientras que la gráfica de referencia mide la absorbancia. Sin embargo, el valor de los picos coincide de manera general con valores característicos de número de onda cerca de 3300, 1650, y entre 1200 y 800.

Por último, el hinchamiento y la toxicidad no fueron posibles de comparar con otros hidrogeles de CMC debido a que no estaba reportado en la literatura dichos resultados, las referencias utilizadas se limitaban a la síntesis y caracterización. No obstante, sí es posible comparar con geles de acrilamida (convencionales). En el caso del hinchamiento, los hidrogeles de CMC obtuvieron valores muy bajos con respecto a aquellos de acrilamida: 5 ml de agua por mililitro de hidrogel, es decir, 500% de su volumen, en comparación con el 827% (Souza et al., 2014). A pesar de esta diferencia, los hidrogeles de CMC siguen siendo una opción más sustentable debido a la diferencia de toxicidad: aquellos de CMC son biodegradables, mientras que los de acrilamida son tóxicos. Además de evitar los compuestos de acrilamida como materia prima, también se evitó su uso como agente entrecruzante al sustituirlo por etilenglicol, siendo este un compuesto que se encuentra de manera natural en los organismos vegetales.

8.2. Conclusiones

Resulta evidente que, hoy en día, existe un daño ambiental significativo que es preciso remediar. Las actividades humanas han deteriorado los ecosistemas de una manera preocupante y las consecuencias son palpables. Este deterioro de los ecosistemas puede notarse en varios aspectos, como son: la degradación del suelo, la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la contaminación etc. Y las consecuencias no solamente afectan al medio ambiente en sí, sino que también a todos los aspectos de la vida cotidiana, como la salud, la economía, la cultura, el entretenimiento e, incluso, el bienestar emocional. Es por ello por lo que la restauración ambiental toma un papel protagonista en la investigación de los problemas actuales.

El desarrollo de este proyecto permitió abarcar -y, por lo tanto, contribuir a la investigación y planteamiento de soluciones -tres ejes ambientales en situación crítica: la degradación de suelos, la escasez de agua, y la pérdida de biodiversidad. El problema principal a solucionar fue la degradación de los suelos, por lo que el uso de hidrogeles se planteó como solución a través de sus propiedades de absorción y retención de agua, que permitieran que los suelos degradados volvieran a desarrollar su capacidad de albergar vida. El uso de hidrogeles también implicaba un menor consumo de agua al aumentar la eficiencia en su uso, por lo que el área de aplicación de los hidrogeles no se limitaba a la restauración ambiental, sino que también se podría aplicar en agricultura, lo cual reduciría significativamente la cantidad de agua utilizada para el riego. Por último, el proponer como materia prima la celulosa, hacía al producto más amigable con el medio ambiente y permitía el uso de especies vegetales consideradas como especies invasoras como fuente de celulosa, contribuyendo al frenado de la pérdida de biodiversidad.

A pesar de que las propiedades de los hidrogeles de CMC no obtuvieron resultados tan altos como los hidrogeles comerciales de acrilamida, se obtuvieron resultados muy

buenos: los hidrogeles sintetizados tienen una estructura química correcta y absorben y retienen una cantidad de agua considerable. Estos resultados nos motivan a continuar la investigación en el área para hacer cada vez más eficientes y más sustentables los hidrogeles de celulosa.

En este proyecto, se utilizaron dos especies invasoras (carrizo y tule) y la celulosa extraída de ambas fue posible utilizarla para la síntesis de hidrogeles (a pesar de que el color del polvo obtenido demostraba que su pureza no era del 100 %), esto abre el debate sobre la cantidad y variedad de especies que pueden ser utilizadas con este fin. Este caso en particular utilizó especies invasoras del manantial de la Mintzita que no tienen un plan de manejo definido, por lo que su recolección para este fin se plantea como opción a considerar para ser parte de dicho plan. En el caso de otras ciudades o países, se podrían utilizar especies de mayor urgencia de control.

Capítulo 9

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdulhameed, A., Mbuvi, H. M., & Changamu, E. O. (2020). Synthesis of cellulose-based superabsorbent hydrogel from rice husk using a microwave. *American Journal of Materials Science*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20201001.01>
2. Ailstock, M. S., Norman, C. M., & Bushmann, P. J. (2001). Common reed *Phragmites australis*: Control and effects upon biodiversity in freshwater nontidal wetlands. *Restoration Ecology*, 9(1), 49–59. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2001.009001049.x>
3. Aldana, J. D. (2012). Gel de carboximetilcelulosa a partir del bagazo de piña.
4. Antoun, H., & Prévost, D. (2006). Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*, 1~38. https://doi.org/10.1007/1-4020-4152-7_1
5. Bansal, S., Lishawa, S. C., Newman, S., Tangen, B. A., Wilcox, D., Albert, D., Anteau, M. J., Chimney, M. J., Cressey, R. L., DeKeyser, E., Elgersma, K. J.,

- Finkelstein, S. A., Freeland, J., Grosshans, R., Klug, P. E., Larkin, D. J., Lawrence, B. A., Linz, G., Marburger, J., ... Windham-Myers, L. (2019). Typha (Cattail) Invasion in North American Wetlands: Biology, Regional Problems, Impacts, Ecosystem Services, and Management. In *Wetlands* (Vol. 39, Issue 4). *Wetlands*. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01174-7>
6. Bécares, E. (2019). Especies invasoras, humedales y salud. *Humedales Tropicales, Especies Invasoras u Salud*, 115–124.
 7. Benítez, J. L., Contreras, D., Guzmán, P., Ramírez, A., Prin, J., De Gáscue, B. R. (2010). Revista Iberoamericana de Polímeros ESTUDIO DE LA DIFUSIÓN Y CINÉTICA Revista Iberoamericana de Polímeros. November 2014, 292–299.
 8. Benítez, J. L., Velásquez, C. L., De Gáscue, B. R. (2015). Kinetic absorption and transport of water on synthesized hydrogels from acrylamide and maleic anhydride. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(2), 242–253.
 9. Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124. [https://repositorio.lasalle.mx/bitstream/handle/lasalle/1770/Seguridad Alimentaria y Nutricional en tiempos de COVID-19 Perspectivas para El Salvador.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.lasalle.mx/bitstream/handle/lasalle/1770/Seguridad%20Alimentaria%20y%20Nutricional%20en%20tiempos%20de%20COVID-19%20Perspectivas%20para%20El%20Salvador.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
 10. Cabrera, J. (2008). El tiempo es un recurso no renovable. <https://www.gestiopolis.com/el-tiempo-es-un-recurso-no-renovable/>
 11. Carmona-Moreno, C., Crestaz, E., Cimmarrusti, Y., Farinosi, F., Biedler, M., Amani, A., Mishra, A., Carmona-Gutierrez, A. (2001). Implementing the Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus and Achieving the Sustainable Development Goals Edited by. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (. <http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>

12. CEDRSSA. (2015). Elementos para la definición de una política pública en México. Reportes CEDRSSA, 3(1), 77–80.
13. CEDRSSA. (2019). El suelo, un recurso invaluable para la producción de alimentos. Investigaciones CEDRSSA, <https://news.ge/anakliis-porti-aris-qveynis-momava>.
14. Chatterji, P. R., Coatings, O., Division, P. (1990). Interpenetrating Hydrogel Networks. I. The Gelatin-Polyacrylamide System *. 40(2297), 401–410.
15. Chen, J., Park, K. (2000). Synthesis and characterization of superporous hydrogel composites. Journal of Controlled Release, 65(1–2), 73–82. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(99\)00238-2](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(99)00238-2)
16. Colin, R., Eguiarte, L. E. (2016). Phylogeographic analyses and genetic structure illustrate the complex evolutionary history of *Phragmites australis* in Mexico. American Journal of Botany, 103(5), 876–887. <https://doi.org/10.3732/ajb.1500399>
17. CONAGUA. (2018). Atlas del Agua en México (2018th ed., Vol. 21, Issue 1). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
18. CONANP. (2012). Programa para la atención y manejo de especies exóticas invasoras y ferales en áreas naturales protegidas de competencia federal.
19. Cordero, R. A. (2018). Diversidad de plantas herbáceas y leñosas en un bosque dominado por cativo (*Prioria copaifera* Griseb) en el Caribe Sur de Costa Rica . (Issue September).
20. del Campo, A. D., Aguilera, A., Lidón, A., Segura, G. (2008). Influencia del tipo y dosis de hidrogel en las propiedades hidrofísicas de tres suelos forestales de distinta textura. Cuadernos de La S.E.C.F., 25, 137–143.

21. Elizondo, R. F. (2021). Construyendo la resiliencia urbana frente al “ Día cero del agua ”. Caso Guadalajara , Jalisco , México Building urban resilience to face “ Cero day of water ”. Guadalajara , Jalisco , Mexico , case study. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, XXI: 41, 110–139.
22. Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., Gomez-Romero, M., & Lindig-Cisneros, R. (2012). Common reed (*Phragmites australis*) harvest as a control method in a Neotropical wetland in Western México. *Hidrobiológica*, 22(2), 125–131.
23. Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., Lindig-Cisneros, R. A. (2009). Efecto del fuego y dinámica de las hidrófitas emergentes en el humedal de la Mintzita, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(3), 771–778. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e>. 2009. 003.172
24. Escutia-Lara, Y., Lindig-Cisneros, R. (2012). Dinámica de *phragmites australis* y *schoeneplectus americanus* en respuesta a la adición de fósforo y nitrógeno en humedales experimentales. 90(4), 459–467.
25. FNA. (2003). *Typha domingensis*. Taxon Page. Flora or North America. Recuperado 10 de septiembre de 2022, de http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1
26. Gamalero, E., Glick, B. R. (2011). Bacteria in Agrobiolgy: Plant Nutrient Management. In *Bacteria in Agrobiolgy: Plant Nutrient Management* (Issue August). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21061-7>
27. Gamboni, J., Sánchez, J., Slavutsky, A., Bertuzzi, M. (2010). Celulosa Proveniente De Bagazo De Caña De Azúcar.
28. Gámez Yáñez, R. S., Lindig-Cisneros, R. (2013). Efecto de la profundidad del agua en la germinación de *Typha domingensis*. *Biológicas*, 15(2), 14–18.

29. Gardner, R. ., & Finlayson, M. (2018). *Perspectiva Mundial Sobre los Humedales: Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas 2018*. In N. Dudley (Ed.), *Convección de Ramsar sobre los Humedales (1st ed.)*. Secretaría de la Convención de Ramsar. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsargwospanishweb.pdf>
30. Gerritsen, P. R. W., Ortiz-Arrona, C., González-figueroa, R. (2009). Usos populares , tradición y aprovechamiento del carrizo: estudio de caso en la costa sur de Jalisco , México Popular usage , tradition and exploitation. *Economía, Sociedad y Territorio*, IX, 185–207.
31. González, E. (2003). La importancia de la conservación del suelo frente a la erosión. *Vida Rural*, 1, 22–24.
32. González, N., Prin, J. L., Luis Benítez, J., Ramírez, A., García, A., Ramirez, M., Sabino, M., Rojas De Gáscue, B. (2012). Estudio de la cinética de difusión en hidrogeles sintetizados a partir de acrilamida-co-ácido acrílico con turba y almidón vía calentamiento convencional y bajo radiación microondas. *Rev. LatinAm. Metal. Mat*, 32(1), 136–144. www.rlmm.org
33. GTIS., F. y. (2015). *Recurso Suelo*. In *Estado Mundial del Recurso Suelo Resumen Técnico: Vol. I (Issue September)*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
34. Guerrero Estrada, R. F., Lemus Torres, D., Mendoza Anaya, D., Rodríguez Lugo, V. (2010). Hidrogeles biopoliméricos potencialmente aplicables en agricultura. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(2), 76–87. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR11/estrada.pdf>
35. Guerrero Villa, Y. P. (2021). Extracción de la celulosa a partir de los residuos de pasto común (*Festuca arundinacea*) para la elaboración de acetato de celulosa.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21590>

36. Hall, S. J., Lindig-Cisneros, R., Zedler, J. B. (2008). Does harvesting sustain plant diversity in central Mexican wetlands. *Wetlands*, 28(3), 776–792. <https://doi.org/10.1672/07-231.1>
37. Hernández, A. (2005). Decreto que declara Área Natural Protegida, con el carácter de Zona Sujeta a Preservación Ecológica, el lugar conocido como “Manantial La Mintzita” y su zona de amortiguamiento, del municipio de Morelia, Michoacán de Ocampo. Periódico Oficial Del Gobierno Constitucional Del Estado de Michoacán de Ocampo, 8. http://132.248.203.28/resamb/Decreto_La_Mintzita.pdf
38. Hodgson, K. (1999). El beneficio de los humedales en América Central. In Director.
39. Hoffman, A. S. (2012). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64(SUPPL.), 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010>
40. Homepage. (s/f). Ramsar.org. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de <https://www.ramsar.org/es>
41. Investigaciones, I. D. E., Ecosistemas, E. N. (n.d.). Universidad nacional autónoma de México.
42. Kalesnik., F., Malvarez, A. I. (2019). Las especies exóticas invasoras en los sistemas de humedales. El caso del Delta inferior del Río Paraná. 1–6. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80785>
43. Karadağ, E., Saraydin, D., Çaldıran, Y., Güven, O. (2000). Swelling studies of copolymeric acrylamide/crotonic acid hydrogels as carriers for agricultural uses. *Polymers for Advanced Technologies*, 11(2), 59–68. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1581\(200002\)11:2 <59 :: AID-PAT937>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1581(200002)11:2<59::AID-PAT937>3.0.CO;2-Z)

44. Kim, S., Iyer, G., Nadarajah, A., Frantz, J. M., Spongberg, A. L. (2010). Polyacrylamide hydrogel properties for horticultural applications. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 15(5), 307–318. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2010.493271>
45. Landgrave, R., Moreno-Casasola, P. (2011). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación Ambiental*, 4(1), 19–35. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/663/humedales.pdf>
46. Lawrence, B. A., Lishawa, S. C., Hurst, N., Castillo, B. T., Tuchman, N. C. (2017). Wetland invasion by *Typha × glauca* increases soil methane emissions. *Aquatic Botany*, 137, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.11.012>
47. Li, S., Chen, G. (2020). Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: Preparation, performance, and socioeconomic impacts. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119669>
48. Lindig C., R. (2017). *Ecología de la restauración y restauración ambiental*.
49. Lishawa, S. C., Lawrence, B. A., Albert, D. A., Tuchman, N. C. (2015). Biomass harvest of invasive *Typha* promotes plant diversity in a Great Lakes coastal wetland. *Restoration Ecology*, 23(3), 228–237. <https://doi.org/10.1111/rec.12167>
50. Lopez Portillo, J. A., Vásquez Reytez, V. M., Gómez Aguilar, L. R., Priego Santander, Á. G. (2010). Humedales. In G. del E. de Veracruz (Ed.), *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz* (pp. 228–248).
51. Loredó-Ostí, C., López-Reyes, L., & Espinosa-Victoria, D. (2004). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: una revisión. *Plant Growth-Promoting Bacteria in Association with Graminaceous Species: A Review*. *TERRA Latinoamericana*, 22(2), 225–239. [researchgate.net/publication/258219164_Plant](https://www.researchgate.net/publication/258219164_Plant)

- _Growth-Promoting_Bacteria_in_Association_with_Graminaceous_Species_A_Review*
52. March, I. J., Martínez, M. (2007). Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad. Prioridades en México. In The Nature Conservancy.
 53. Marín Togo, M. del C., & Blanco García, A. (2009). Ficha informativa de los humedales de Ramsar, La Mintzita. 7(1999), 21. http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/ramsar/docs/sitios/FIR_RAMSAR/Michoacan/La_Mintzita/LA_MINTZITA_FIR.pdf
 54. Meave del Castillo, M. E. (2014). especies invasoras en México. *Especies Acuáticas Invasoras En México*, 289–308.
 55. Mendoza-Hernández, P., Rosete-Rodríguez, A., Pedrero-López, L., Martínez-Villegas, J., Sánchez-Coronado, M., Orozco-Segovia, A. (2016). Estrategias ecofisiológicas para la restauración de un pedregal urbano: el caso del Parque Ecológico de la Ciudad de México. *Experiencias Mexicanas En La Restauración de Los Ecosistemas*, January, 238–254.
 56. Mitsch, W., Bernal, B., Hernández, M. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services Management*, February 2015, 1–2.
 57. Moreno-Casasola, P., Infante Mata, D., Madero-Vega, C. (2019). Germinación Y Supervivencia De Dos Especies De Acahual De Selva Baja Para Restaurar Dunas Costeras. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 19–36. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.572>
 58. Moreno-Mateos, D., Power, M. E., Comín, F. A., Yockteng, R. (2012). Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. *PLoS Biology*, 10(1). <https://doi.org/>

10.1371 / journal.pbio.1001247

59. Moreno Navarro, I., Rubio Armendáriz, C., Gutiérrez Fernández, A., Cameán Fernández, A., Hardisson de la Torre, A. (2007). Toxicidad De Acrilamida. *Revista de Toxicología*, 24(1), 1–9.
60. Moya, B. V., Hernández, A. E., Elizalde Borrell, H. (2005). Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas*, 37, 127. <https://doi.org/10.14198/ingeo2005.37.07>
61. Nascimento, D. M., Nunes, Y. L., Figueirêdo, M. C. B., De Azeredo, H. M. C., Aouada, F. A., Feitosa, J. P. A., Rosa, M. F., Dufresne, A. (2018). Nanocellulose nanocomposite hydrogels: Technological and environmental issues. *Green Chemistry*, 20(11), 2428–2448. <https://doi.org/10.1039/c8gc00205c>
62. Nichols, G. (2020). Best Management Practices in Ontario. www.ontario.ca/invasive-species
63. Orgaz, F. (2015). El Ecoturismo en los Humedales: Análisis de las Potencialidades de República Dominicana. *Rosa Dos Ventos*, 1, 4–18. <http://ucs.br/revistarosadosventos>
64. Páramo Pérez, M. E., Lindig-Cisneros, R., Moreno-Casasola, P. (2018). Invasiveness of *Phragmites australis* in communities dominated by native species after fire disturbance under controlled conditions. *Hidrobiologica*, 28(2), 201–207. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n2/lindig>
65. Paredes-García, S. S., Moreno-Casasola, P., de la Barrera, E., García-Oliva, F., Lindig-Cisneros, R. (2021). Biomass and carbon storage in a continental wetland in Cuitzeo, Michoacán, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(2), 1–17. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-02-09>

66. Peppas, N. A., Bures, P., Leobandung, W., Ichikawa, H. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 50(1), 27–46. [https://doi.org/10.1016/S0939-6411\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(00)00090-4)
67. Perez, D. R. (2013). Restauración De Ecosistemas Áridos Y Semiáridos Patagónicos: Implementación Desde Un Enfoque Ecológico Y Social. *Restauración Ecológica En La Diagonal Árida de La Argentina*, 49–60.
68. Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>
69. Punschke, K., Mayans, M. (2012). Selección de cepas de *Herbaspirillum* spp. promotoras del crecimiento de arroz. *Agrociencia*, 15(1), 19–26. <https://doi.org/10.31285/agro.15.607>
70. Ramsar. (2015). Humedales: ¿Por qué cuidarlos? Fichas Informativas Ramsar, 1–2. http://www.ramsar.org/sites/default/files/ramsar_factsheet_wetland-care1sp.pdf
71. Ramsar. (2016). Introducción a la convención sobre los humedales (Secretaría de la Convención de Ramsar (ed.); 5a).
72. Ramsar. (2016, 2 septiembre). El planeta en la encrucijada: Los humedales saludables, esenciales para lograr un desarrollo sostenible | Convention on Wetlands. Convention on Wetland. Recuperado 23 de noviembre de 2022, de <https://www.ramsar.org/es/nuevas/el-planeta-en-la-encrucijada-los-humedales-saludables-esenciales-para-lograr-un-desarrollo>
73. Reuters, T., Reserved, A. R., Manuscripts, S., Patents, S. M., Statement, P. (2015). *International Journal of Biodiversity Science , Ecosystem Services Management*.

February 2015, 1–2.

74. Ríos, H. Vargas, O. (2003, February). Ecología de las especies invasoras. 14.
75. Rivera Fernández, R. D., Mesías Gallo, F. (2018). Absorción de agua de hidrogel de uso agrícola y su humedecimiento de tres tipos de suelo - Water absorption hydrogel agricultural use and wetting of three soil types. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 50(Vol. 50, 2), 15–21.
76. Rodríguez-Arias, C., Gómez-Romero, M., Páramo-Pérez, M. E., Lindig-Cisneros, R. (2018). Ten-year study of vegetation dynamics in wetlands subject to human disturbance in Western Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 910–920. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.1771>
77. Rogers, D. (2005). Retención y exportación de sedimentos y nutrientes. In *Humedales, servicios de los ecosistemas. RAMSAR*
78. Rooth, J. E., Stevenson, J. C., Cornwell, J. C. (2003). Increased sediment accretion rates following invasion by *Phragmites australis*: The role of litter. *Estuaries*, 26(2 B), 475–483. <https://doi.org/10.1007/BF02823724>
79. Ruiz-luna, A., Trujillo, F. (n.d.). humedales de México.
80. Sáez, V., Hernández, E., Sanz, L. (2003). Liberación controlada de fármacos. Hidrogeles. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4(1), 21–91.
81. Saputra, A. H., Qadhayna, L., Pitaloka, A. B. (2014). Synthesis and Characterization of Carboxymethyl Cellulose (CMC) from Water Hyacinth Using Ethanol-Isobutyl Alcohol Mixture as the Solvents. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 5(1), 36–40. <https://doi.org/10.7763/ijcea.2014.v5.347>

82. SEMARNAT. (2020, agosto). Por qué decir NO al glifosato. gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/por-que-decir-no-al-glifosato?idiom=es>
83. Shahzamani, M., Taheri, S., Roghanizad, A., Naseri, N., & Dinari, M. (2020). Preparation and characterization of hydrogel nanocomposite based on nanocellulose and acrylic acid in the presence of urea. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.038>
84. SINA. (2022). Numeragua (CONAGUA (ed.); 2022nd ed., Vol. 1, Issue 1). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
85. Souza, M. G. de, Figueroa de Gil, Y., Ramírez, A. L., Prin, J. L., Guzmán, P. J., Otero, B., Rodríguez, C., Katime, I., Rojas de Gáscue, B. (2014). Hidrogeles de Poli(Acrilamida): evaluación de su comportamiento en fluido fisiológico simulado (SBF). *Revista Iberoamericana de Polímeros (Internet)*, 15(4), 198–210. <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/JUL14/souza.pdf>
86. Suelo, D. D. E. L. (2003). Indicadores físicos de la degradación de suelo.
87. Swearingen, J., Saltonstal, K. (2010). Phragmites field guide. Distinguishing native and Exotic Forms of Common Reed (*Phragmites australis*) in the United States. Plant Conservation Alliance, Weeds Gone Wild.
88. Terán, E., & Escalera Vásquez, R. (2007). Obtención De Carboximetilcelulosa a Partir De Linter De Algodón. *Investigacion Desarrollo*, 7(1), 100–113. <https://doi.org/10.23881/idupbo.007.1-8i>
89. Thomaz, S. M., Mormul, R. P., Michelan, T. S. (2015). Propagule pressure, invasibility of freshwater ecosystems by macrophytes and their ecological impacts: a review

- of tropical freshwater ecosystems. *Hydrobiologia*, 746(1), 39–59. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2044-9>
90. *Typha domingensis* - ficha informativa. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 11 de noviembre de 2022, de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>
91. *Typha* in flora of north America efloras.org. (s/f). Efloras.org. Recuperado el 11 de noviembre de 2022, de http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=134063
92. Tulbure, M. G., Johnston, C. A., Auger, D. L. (2007a). Rapid invasion of a Great Lakes coastal wetland by non-native *Phragmites australis* and *Typha*. *Journal of Great Lakes Research*, 33(SPEC. ISS. 3), 269–279. [https://doi.org/10.3394/0380-1330\(2007\)33\[269:RIOAGL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2007)33[269:RIOAGL]2.0.CO;2)
93. Uddin, M. N., Robinson, R. W. (2017). Changes associated with *Phragmites australis* invasion in plant community and soil properties: A study on three invaded communities in a wetland, Victoria, Australia. *Limnologia*, 66(July), 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.07.006>
94. UNCCD. (2022). *Land Restoration for Recovery and Resilience* (second edi). United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
95. UNFPA. (s/f). Population data portal. <https://pdp.unfpa.org/>. Recuperado el 18 de octubre de 2022, de <https://plants.ifas.ufl.edu/plant-directory/>
96. UNICEF. (2021, marzo 21). Saneamiento. Organización Mundial de la Salud. Recuperado 15 de noviembre de 2022, de <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/sanitation>

97. United Nations. (s/f). Agua | Naciones Unidas. Recuperado el 01 de noviembre de 2022, de <https://www.un.org/es/global-issues/water>
98. United Nations. (s/f-b). Población | Naciones Unidas. Recuperado el 13 de octubre de 2022, de <https://www.un.org/es/global-issues/population>
99. University of Florida. (s/f). center for aquatic and invasive plants. <https://plants.ifas.ufl.edu/plant-directory/>. Recuperado el 11 de noviembre de 2022, de <https://pdp.unfpa.org/apps/0aeda6af00dd4544ba50452da2dda474/explore>
100. Van de Lande, L. (2015). Eliminating discrimination and inequalities in access to water and sanitation. UN Water, May, 1–56. <http://www.unwater.org/publications/eliminating-discrimination-inequalities-access-water-sanitation/>
101. Velásquez, L. (2016). Moluscos dulciacuícolas nativos e introducidos y su impacto en salud humana y animal en Colombia. *Especies Invasoras Acuáticas y Salud*, 153–154. www.invawet-cyted.org
102. Verburg, G. Metternicht, C. Allen, N. Debonne, Akhtar-Schuster, M. Inácio da Cunha, Z. K., A. Pilon, O. Raja, M. Sánchez Santivañez, and A. Ş. (2019). Un informe de la Interfaz Ciencia-Política.
103. Water scarcity. (s/f). UN-Water. Recuperado el 29 de octubre de 2022, de <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
104. World Population Dashboard. (s/f). Fondo de Población de las Naciones Unidas. Recuperado el 05 de noviembre de 2022, de <https://www.unfpa.org/es/data/world-population-dashboard>
105. Zedler, J. B., Kercher, S. (2004). Causes and consequences of invasive plants in wetlands: Opportunities, opportunists, and outcomes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(5), 431–452. <https://doi.org/10.1080/07352680490514673>

106. Zedler, J. B., Kercher, S. (2005). Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39–74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>
107. Zolla, C., Márquez, E. Z. (2018). ¿Qué es el Convenio sobre la Diversidad Biológica? *Los Pueblos Indígenas de México*, 341–347. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xxvwr.87>

