

ITSİ | TEREKUA

Diseño de Biofiltros de Micelio para la Biorremediación de aguas contaminadas

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH
División de estudios de posgrado de la Facultad de Arquitectura
**[MDA] Maestría en Diseño Avanzado Orientación:
Profesionalizante**

Tesis para obtener el grado de Maestra en Diseño Avanzado

Linea de Investigación e incidencia social:
Diseño experimental para la innovación,
Diseño para el Hábitat sustentable.

Presenta:
Arq. Stephanie Zapata Giraldo

Director de tesis:
Dr. Habid Becerra Santacruz
Co directora:
Dra. Gloria Lariza Ayala Ramirez
Co-Asesoría Externa por:
MEQ. Sebastian Yepes Largo

DICIEMBRE 2025 Morelia - México



ITSİ | TEREKUA

Diseño de Biofiltros de Micelio para la Biorremediación de aguas contaminadas



Tesis Presentada por: Arq. Stephanie Zapata Giraldo

Diciembre 2025



FAUM



MAESTRÍA
EN DISEÑO AVANZADO

**Ciencia y
Tecnología**
Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



ITSİ | TEREKUA



**Diseño de Biofiltros de Micelio para la
Biorremediación de aguas contaminadas**

Tesis Presentada por: Arq. Stephanie Zapata Giraldo





ITSi|TEREKUA

Biofiltro Micelio

**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo UMSNH**

Maestría en Diseño Avanzado **[MDA]**

Presenta:

Arq. Stephanie Zapata Giraldo

Dirigida por:

Dr. Habid Becerra SantaCruz

Co-Dirigida por:

Dra. Gloria Lariza Ayala Ramírez

Co-Asesoría Externa por:

MEQ. Sebastian Yepes Largo

2023-2025

Morelia - México

Sinodales

Dra. Gloria Lariza Ayala Ramírez
Sinodal Interno (Co-Directora)

Dr. Axel Becerra Santacruz
Sinodal interno "NAB"

Dr. Alberto Gomez Tagle
Sinodal Externo

MDA. Rayito Flores Pelcastre
Sinodal Externo

ITSi

Resumen



La investigación aborda el problema de la contaminación de fuentes hídricas naturales en Latinoamérica, causada principalmente por el vertimiento inadecuado de aguas residuales debido a sistemas de alcantarillado insuficientes. Este fenómeno ha impulsado el crecimiento urbano desordenado, afectando gravemente los ecosistemas acuáticos. A pesar de las estrategias de tratamiento del agua implementadas, persisten deficiencias en la gestión de aguas residuales, exacerbadas por factores como el cambio climático y la mala administración de los recursos hídricos. Ante este desafío, se propone integrar procesos de diseño regenerativo para los ecosistemas acuáticos, utilizando tecnologías como los biofiltros de micelio, que emplean microorganismos para la biorremediación del agua.

Este estudio se enfoca en la implementación de micelio, un organismo con propiedades que atraen metales pesados presentes en el agua, ayudando a depurarla. El estudio se desarrolla con las aguas residuales con características de nitrógeno, fósforo y Potasio presente en la ciudad de Morelia, México, con el objetivo de restaurar la calidad del agua y promover el desarrollo de prácticas sustentables mediante el saneamiento y regeneración de ecosistemas. Se analizan las características del micelio en el estado de Michoacán y se desarrollan prototipos para el tratamiento del agua, evaluando su efectividad en la reducción de metales pesados.

El proyecto se Desarrolla en cinco capítulos: Abundancia, crecimiento y proliferación de las cepas de micelio, diseño y biofabricación del biofiltro, biorremediación del agua, resultados, aplicaciones y proyecciones futuras. En el cual

se evidencia una reducción de materiales contaminantes en las aguas estudiadas, obtenida del filtrado con sistemas vivos como el micelio.

Palabras clave: Micelio, Biorremediación, agua, Hongos, biomateriales

Abstract

The research addresses the problem of contamination of natural water sources in Latin America, mainly caused by the improper discharge of wastewater due to insufficient sewage systems. This phenomenon has fueled disorganized urban growth, severely affecting aquatic ecosystems. Despite the implementation of water treatment strategies, deficiencies in wastewater management persist, exacerbated by factors such as climate change and poor water resource administration. In response to this challenge, the integration of regenerative design processes for aquatic ecosystems is proposed, using technologies such as mycelium biofilters, which employ microorganisms for water bioremediation.

This study focuses on the implementation of mycelium, an organism with properties that attract heavy metals present in water, aiding in its purification. The research is carried out using wastewater containing nitrogen, phosphorus, and potassium, as found in the city of Morelia, Mexico, with the aim of restoring water quality and promoting the development of sustainable practices through ecosystem sanitation and regeneration. The characteristics of mycelium in the state of Michoacán are analyzed, and prototypes for water treatment are developed, evaluating their effectiveness in reducing heavy metals.

The project is developed in five chapters: Abundance, growth, and proliferation of mycelium strains; design and biofabrication of the biofilter; water bioremediation; results; applications and future projections. The study demonstrates a reduction of pollutants in the tested waters, achieved through filtration using living systems such as mycelium.

Key words: Mycelium, Bioremediation, water, Fungi, biomaterials



MAESTRÍA
EN DISEÑO AVANZADO

Ciencia y
Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Este trabajo se realizó en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en la división de estudios de posgrado de la Facultad de Arquitectura en el programa **Maestría en Diseño Avanzado [MDA]**, bajo la dirección de

Dr. Habid Becerra Santacruz

Dra. Gloria Lariza Ayala Ramírez

Agradecimientos

Quiero expresar mi mas sincero agradecimiento a mi grupo de asesores quienes fueron fundamentales en la ejecución de este estudio, principalmente la vinculación con laboratorios especializados para la validación de las condiciones del agua, como el Centro de Investigaciones en Electroquímica **CIDETEQ**, en la ciudad de Querétaro y el tratamiento de agua en el Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales **INIRENA** en el Laboratorio de Ecología Acuática de la ciudad de Morelia Michoacán.

A mi familia que han sido motor e inspiración para cada parte del camino, en la distancia, en la luz, en la oscuridad, en cada tiempo y plano energético, gracias a cada uno de ustedes por su amor infinito. A la UMSNH y al SECIHT por el apoyo financiero y finalmente agradezco a todas los seres biológicos y humanos involucradas en este estudio.



*Dedicado a las comunidades purépechas, guardianas
ancestrales del agua y su memoria viva, cuyo
conocimiento fluye como los manantiales que nutren la
tierra. A su relación sagrada con los hongos, semillas
de sabiduría que conectan mundos invisibles. Que este
trabajo honre su historia, su territorio y la fuerza que
emana de su cosmovisión.*

*I*TSĬ-AGUA
*T*EREKUA-HONGO

Traducción lengua purépecha

SZG

CaP 1

Pág.

19

1.Introducción	21
(Principios básicos de tratamiento aguas contaminadas con sistemas vivos)	
2.Planteamiento del problema	23
(Contaminación de agua global historia, México y Morelia)	
2.1 Estrategias para disminuir contaminación del agua	29
(Antecedentes históricos) Latinoamérica, México, Morelia	
2.2 Métodos para la caracterización del agua, las técnicas que cuantifican los parámetros de calidad del agua	42

CaP 2

Pág.

45

3.Marco teórico conceptual	45
(identificar autores clave) agua + diseño+ micelio = regeneración del ecosistema	
4.Estado del arte	52
(trabajos con problemas similares) (conceptos centrales desarrollo) (identificar autores clave)	
4.1 Estrategias de Biorremediación con hongos de micelio	54
4.2 Análisis condiciones ambientales del agua contaminada.	60
4.3 Formas biológicas para la restauración ecosistémica acuática	63
4.4 Posturas de teoría de diseño en desarrollo de nuevas prácticas y procesos biomateriales	67

CaP 3 Pág. 77

5. Justificación 80

Actores involucrados

6. Cuadro de Congruencia 83

Hipótesis

Pregunta General

Objetivo General

Objetivos Específicos

7. Metodología 86

Metodologías específicas de cada fase de investigación:

Fase I: Crecimiento del Biomaterial: Cultivo del Micelio 86

Fase II: Diseño y desarrollo de prototipos de Biofiltros de micelio 91

Fase III: Construcción del Microcosmos filtrado del agua con presencia de contaminantes como Nitrógeno, Fósforo, Potasio con micelio de Pleurotus Ostreatus. 97

Fase IV: Validación del Filtrado del agua, con técnicas de Impedancia y UV-vis 101

CaP 4 Pág. 110

8. Resultados 110

Fase I: Experimentación Desarrollo del Biomaterial: Cultivo y Caracterización del Micelio 112

Fase II: Resultados Diseño y Prototipado Diseño digital y Morfología, fabricación producción y herramientas digitales 123

Fase III: Filtración de Agua con Micelio y Evaluación de la Edad de Vida del Organismo 139

Fase IV: Pruebas de Validación EIS 144 Pruebas de Validación UV-Vis 148 Diseño y Aplicaciones 155

CaP 5 Pág. 170

9. Reflexiones Finales 172

10. Cronograma de Actividades 174

11. Referencias bibliográficas 175

12. Anexos 184

Fichas Laboratorio Material

Fichas Biomaterial

Fichas de ciclo final Biomaterial

Presupuesto

ITSi

Listado de Imagenes

Figura 1. Crecimiento Poblacional y brecha de desigualdad
Fuente: El informe de la Organización Mundial de la Salud (Oms) y UNICEF de 2021

Figura 2. Mapa Disponibilidad de sistema de saneamiento y abastecimiento de agua potable a nivel mundial

Figura 3. Mapa de la ciudad de Morelia, componentes hídricos
60% de los arroyos en la ciudad presentan niveles elevados de contaminantes

Figura 4. Sistema de acueductos de Machupichu, Incas Siglo V

Figura 5. Transporte de agua potable a comunidades prehispánicas en el siglo xx

Figura 6. Línea del tiempo Construcción, desarrollo de acueducto y drenaje

Figura 7. Tipos de contaminación agua potable, Recuperadode: World Health Organization (WHO). (2020). Guidelines for drinking-water quality. (4th ed.). Riesgos potenciales de cáncer, problemas gastrointestinales.

Figura 8. Tipos de contaminación agua potable, Recuperadode: World Health Organization (WHO). (2020). Guidelines for drinking-water quality. (4th ed.). Riesgos potenciales de cáncer, problemas gastrointestinales.

Figura 9. Métodos para la caracterización del agua, las técnicas espectrométricas para la cuantificación de los parámetros de calidad del agua

Figura 10. Celda de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y elementos pasivos

Figura 11. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría

Figura 12. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría UV-visible

Figura 13. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría de absorción atómica

Figura 14. Esquema de jerarquía conceptual

Figura 15. Esquema de jerarquía conceptual y acciones de referencia

- Figura 16. Abundancia material zona de estudio
- Figura 17. Biofiltro Ganoderma, filtrado del agua, Ecuador
- Figura 18. Partes principales de un seta adulta. (Rinaudo, 2006)
- Figura 19. Un módulo flotante de micelio es capaz de limpiar los ríos contaminados de Estados Unidos, Recuperado: <https://www.archdaily.mx/mx/1011257/>
- Figura 20: Referentes analógicos desarrollo con biomasa de Micelio, país y año de producción
- Figura 21 .Esquema de Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV) Autor. Instituto Tecnológico de Canarias, ITC recuperado: <https://depuranatura.blogspot.com/>
- Figura 22. Esquema posturas de Diseño
- Figura 23. Materiales regenerativos, Pabellón de gusanos de sed
- Figura 24. Materiales regenerativos,
- Figura 25. Justificación, ODS
- Figura 26. Actores Involucrados
- Figura 27. Metodología general
- Figura 28. Especies de Hongo Pleurotus Ostreatus
- Figura 29. Agar agar- Miel, Caja Petri especie Skitake
- Figura 30. Instrumentos utilizados para evitar contaminación en el cultivo
- Figura 31. Agar agar- semillas de base
- Figura 32. Agar agar-sembrado en Semillas de trigo
- Figura 33. Agar agar- Miel, Caja Petri especie Skitake
- Figura 34. Proceso de pasteurización del sustrato
- Figura 35. Cajas De acrílico, de 60cm x 35cm de alto
- Figura 36. cajas móviles
- Figura 37: Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia
- Figura 38. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia
- Figura 39. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia
- Figura 40. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia
- Figura 40. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia
- Figura 41. Procesos de sostenibilidad y fases de aplicación
- Figura 42. Esquema Diseño o del Biomaterial aportes e impactos. Fuente: (Vandelook, 2021)
- Figura 43. Evolución de escenarios de Filtrado del agua, diferentes edades y volúmenes de análisis en el microcosmos, edad a 1 día y a 30 días de filtrado. Fuente: Registro fotográfico, Zapata 2025
- Figura 44. Metodología Fase III Esquema diseño experimental, filtrado y validación de técnicas
- Figura 45. Evolución de escenarios de Filtrado del agua, diferentes edades y volúmenes de análisis en el microcosmos, edad a 1 día y a 30 días de filtrado. Fuente: Registro fotográfico, Zapata 2025
- Figura 46. Registro fotográfico del Microcosmo para la filtración del agua con Micelio Pleurotus con fibra de trigo, avena y coco
- Figura 47. Pruebas de resistencia de Impedancia Electroquímica
- Figura 48. Pruebas de condiciones de agua, Espectroscopia Uv-visible
- Figura 49. metodología Fase IV Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) grafico celdas electroquímicas
- Figura 50. Metodologia Fase IV Pruebas espectrofotometricas UV-Vis
- Figura 51. Tabla de métodos y concentraciones de reactivos
- Figura 52. Solución estándar curva de calibración fósforo total
- Figura 53. Solución estándar curva de calibración Nitrito
- Figura 54. Curva de calibración Fosforo Total
- Figura 55. Curva de calibración Ortofosfato
- Figura 56. Curva de calibración Amonio
- Figura 57. Curva de calibración Nitrito
- Figura 58. Agares y semillas inoculadas, variedad de especies de hongos
- Figura 59. Semilla de trigo con especies de hongos locales
- Figura 60. Proliferación de la sepa en 8 días de incubación
- Figura 61. Nutrientes al sustrato natural
- Figura 62. Sembrado de micelio en variedad de sustrato como:

papel, fibra coco, trigo, flor de jacarandá y cartón

Figura 63.. Evolución del crecimiento del micelio

Figura 64. Colonización de cepas miceliales en sustratos naturales

Figura 65. Colonización de cepas miceliales en sustratos naturales

Figura 66. Colonización de cepas miceliales en sustratos naturales

Figura 67. Revisión del cultivo y contaminación

Figura 68. Almacenamiento e incubación

Figura 69. Moldes acrílicos placas de 1 cm

Figura 70. Moldes acrílicos placas de 1 cm

Figura 71. Vaso de silicona y micelio

Figura 72. Especímenes Pleurotus Ostreatus-Gris en fibra de coco

Figura 73. Diseño experimental herramientas área de trabajo, especímenes, placas, cubos y bolsa y zona de incubación oscura

Fuente: registro fotográfico Autoría propia

Figura 74. Especímenes Pleurotus Ostreatus-Gris en fibras de Trigo, Avena y coco.

Figura 75. Especímenes Pleurotus Ostreatus-Gris en fibra de Trigo y Avena

Figura 76. Impresión en 3D, redes y moldes

Figura 77. Impresión en 3D, redes y moldes

Figura 78. Moldes Prototipo de micelio de Pleurotus Ostreatus en fibra de trigo Septiembre de 2024

Figura 79. Prototipo de micelio de pleurotus ostreatus en fibra de trigo Septiembre de 2024

Figura 80. Desarrollo planimétrico de propuesta A

Figura 81. Desarrollo morfológico y registro fotográfico de propuesta A

Figura 82. Registro fotográfico de propuesta aplicación piloto en agua

Figura 83. Registro fotográfico de propuesta aplicación piloto en agua

Figura 84. Optimización del Diseño de Moldes y Producción de Bloques de Micelio para Sistemas de Filtración

Figura 85. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de trigo en molde de acrílico y bolsas de kilos de más de 30 días de edad

Figura 86. Diseño del prototipo, disposición y modulación

Figura 87. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de trigo en molde de acrílico de más de 30 días de edad

Figura 88. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de coco en microcosmos plásticos, de más de 30 días de edad, con presencia de contaminantes y ciclo final en compostaje y zonas de jardín

Figura 89. Gráfico Pruebas de conductividad al agua de los escenarios Trigo, Avena, coco Y base de contraste Blanco y línea de vida del Micelio en proceso de filtración

Figura 90. Proceso de filtración de microcosmo de Coco con el sistema de riego construido

Figura 91. Escenario 3 de coco en proceso de filtración y toma de muestras de las aguas de estudio

Figura 92. Diagrama de NYQUIST filtrado 1: 1 semana

Figura 93. Diagrama de NYQUIST filtrado 2: 3 semana

Figura 94. Celda 3 electrodos, EIS.

Figura 95. Fosforo Total en agua filtrada en sustratos con Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

Figura 96. Ortofosfato en agua filtrada en sustrato Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

Figura 97. Amonio en agua filtrada en sustrato de Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

Figura 98. Nitrito en agua filtrada en sustrato de Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

Figura 99. Diseño Escenario A, Módulo de Filtración Vertical

Figura 100. Diseño Escenario A, Módulo de Filtración Vertical

Figura 102. Células contenedoras de filtrado recipientes plásticos.

Figura 103. Sección detalle humedal red de abasto Casa domestica peri urbana

Figura 104. Imaginarios y detalle humedal red de abasto Casa domestica peri urbana

Figura 105. Ciclo de vida del Biofiltro

Figura 106. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables

Figura 107. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables

Figura 108. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables

Figura 109. Cronograma de Actividades

Listado de imagens Anexos

Figura 1. Diseño experimental Producción del micelio seta Gris.
Fuente: Autoría propia

Figura 2. Diseño experimental Revisión del biomaterial cultivo del micelio Fuente: Autoría propia

Figura 3. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 4. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 5. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 6. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 7. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 8. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 9. Fichas técnicas de ciclo final del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 10. Fichas técnicas de ciclo final del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 11. Fichas técnicas de ciclo final del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 12. Fichas técnicas de ciclo final del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Figura 13. Fichas técnicas costos del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

ITSi

Listado de Abreviaciones

AAS. Absorción Atómica
As. Arsénico
Co. Concentración inicial del contaminante
Cd. Cadmio
CE. Contraelectrodo
COT. Carbono Orgánico Total
CONAGUA. Comisión Nacional del Agua
Cf. Concentración final del contaminante
CPE. Elemento de Fase Constante
DBO. Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQD. Demanda Química de Oxígeno
E. potencial
EIS. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica
ER. Electrodo de Referencia
(3E). Sistema de tres electrodos
H₂O. Agua
Hg. Mercurio
Hz. Hertz
I. corriente
INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIRENA. Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales
ITSi-AGUA. Traducción al idioma purépecha (agua)
kHz. KiloHertz
K. Potasio
MDA. Maestría en Diseño Avanzado
mg/L. Miligramos por litro
Mv. Milivoltios (Reducción)
N. Nitrógeno
N-NH₄O. Nitrógeno amoniacal
NED. Reactivo NED (etilendiamina)
NFQ. Nanofilamentos de Quitina
NH₃. Amoníaco
NH₄O. Amonio

NO₂. Nitritos
NO₂O. Nitrito en solución
NO₃. Nitratos
NO₃O. Nitrato en solución
Nm. Nanómetros
ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS. Organización Mundial de la Salud
ORP. Potencial de Oxidación-Reducción
Pb. Plomo
pH. Potencial de Hidrógeno
Pleurotus spp. *Pleurotus ostreatus*
PO₄³⁻O. Fosfato (ortofosfato)
P. Fósforo
P-PO₄³⁻O. Fosfato en forma de ortofosfato
Ppm. Partes por millón (cloruro indicador de sal)
R1. Resistencia eléctrica
SDT. Sólidos Disueltos Totales
SG. Gravedad Específica
SST. Sólidos Suspendidos Totales
TDS. Sólidos disueltos totales
TEREKUA-HONGO. Traducción al purépecha (hongo)
UMSNH. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
UNICEF. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
UV-Visible. Espectrofotometría Ultravioleta-Visible
WE. Electrodo de Trabajo
Z impedancia

ITSi

Glosario

ITSi: Significa **Agua** en lengua Purépecha.
y hongo se escribe Terekua.

El micelio, permite degradar materia orgánica muerta y desintoxicar cuencas de arroyos, puede desintegrar contaminantes y compuestos tóxicos en el agua, como hidrocarburos, pesticidas y metales pesados (Vandelook, 2021).

La biorremediación con hongos y micelio implementa organismos fúngicos para la descomposición, transformación y eliminación de contaminantes en suelos y aguas (Gadd, 2001).

Diseño

El diseño regenerativo se centra en crear sistemas que restauren, renueven y fortalezcan los ecosistemas naturales y sociales, en lugar de solo reducir los impactos negativos. Busca integrar los procesos humanos con los ciclos naturales, promoviendo la resiliencia ecológica y la salud planetaria. Este enfoque considera los lugares como sistemas vivos interconectados, donde las intervenciones de diseño deben contribuir a la regeneración continua de la

vida. A diferencia de la sostenibilidad, el diseño regenerativo apunta a un impacto positivo neto (Mang, 2016).

El desarrollo de **biomateriales** muestra resultados prometedores, como la creación de membranas vivas adaptadas a las necesidades del hábitat (Metcalf, 2014).

Las **abundancias locales** permiten la conservación de recursos y el reciclaje de materias primas como la celulosa orgánica, permite la integración de técnicas sustentables para la obtención de un material (González, 2019)

Biológico - Hongo

Las **especies de hongos**, como *Pleurotus* spp, *Trametes versicolor* y *Ganoderma*, han mostrado potencial en estos estudios (Valencia, 2017).

Las hifas son filamentos microscópicos que constituyen la estructura fundamental de los hongos, formando redes llamadas micelio. Estas estructuras crecen y se ramifican para absorber nutrientes del entorno mediante la secreción de enzimas. Su organización permite la expansión y la reproducción del hongo en diversos sustratos

La quitina desempeña un papel crucial en la estructura y protección, actuando como un componente fundamental de la pared celular. Es el segundo polímero natural más abundante después de la celulosa. Es usada como agente floculante para tratamiento de agua, Es altamente insoluble en agua y en solventes orgánicos debido a los enlaces de hidrógeno que presenta la molécula, En su forma pura y sin modificar, la quitina es translúcida, flexible, resistente y

bastante resistente a la humedad.

Biológico Agua

La micorremediación: Se utiliza hongos para degradar contaminantes complejos, tales como hidrocarburos, pesticidas y metales pesados, se lleva a cabo a través de la oxidación enzimática (Mekonnen, 2022)

Microfiltros: Se han utilizado microfiltros de micelio para tratar aguas afectadas por contaminantes como bacterias coliformes fecales en arroyos y ríos locales mencionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020)

Eutrofización Esta se produce por un exceso de nutrientes en el agua (sobre todo nitrógeno y fósforo) derivando de algas y malos olores

Metales pesados como plomo, mercurio y cadmio, provenientes de desechos industriales y de la actividad automotriz (Martínez, 2023)

Iones Átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

El **pH** es una medida del nivel de concentración de iones de hidrógeno, es decir nos indica cuán ácida o alcalina es el agua.

Temperatura de agua °C Parámetro fundamental que influye en diversos procesos físicos, químicos y biológicos

Concentración de contaminantes en el agua ppb, Sólidos disueltos: el contenido total de sólidos disueltos incluye una mezcla de sales inorgánicas,

principalmente sodio, cloruro, potasio, calcio y magnesio. La presencia de: alcalinidad o dureza (calcio, magnesio, **nitrógeno y fósforo**), cloruro (un indicador de la sal para carreteras o de la intrusión de agua marina, oxígeno disuelto, niveles de carbono orgánico (DBO la demanda biológica de oxígeno, COT medida del carbón orgánico, DQD demanda química de oxígeno), agroquímicos (pesticidas o fertilizantes específicos), o contaminantes industriales/mineros (p. ej., bifenilos policlorados, cianuro). Por último, los metales pesados como el plomo, el mercurio, el cobre, el cromo.

Pruebas de validación

Degradación de contaminantes *Pleurotus* spp puede descomponer una variedad de compuestos orgánicos y es resistente a condiciones ambientales adversas, lo que facilita su uso en diferentes entornos contaminados (Juwarkar, 2010; Arya, 2020).

Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica que mide cómo un material responde a una señal eléctrica, analizando su resistencia al flujo de corriente Frecuencia

Espectroscopia Fotométrica es una técnica analítica que estudia la interacción entre la luz y la materia. Se basa en medir la cantidad de luz que un material absorbe, dispersa o emite.



Antecedentes

Históricos y actuales

**Principios básicos de tratamiento
aguas contaminadas con sistemas
vivos**

Agua contaminada



El Capítulo 1, titulado “**Antecedentes y principios básicos de practicas para el tratamiento aguas contaminadas con sistemas vivos**” este segmento contiene las bases de soporte para situar la problemática de la investigación, en donde el contexto global nos muestra datos referente al acceso de agua y tratamiento luego de su uso, se identifican las variables mexicanas para gestión hídrica y se estudian las practicas históricas que condicionan la situación de la escasez del agua en ciudades mexicanas, se analizan los contaminantes presentes en las aguas de la ciudad de Morelia entendiendo sus impactos y oportunidades para el tratamiento de aguas con exceso de materiales contaminantes y finalmente se mencionan las pruebas de validación existentes referente a las condiciones del agua.

ITSi

1.Introducción

La contaminación de fuentes hídricas naturales, como arroyos, quebradas, lagos y ríos es un problema crítico en muchos países de Latinoamérica. Es un fenómeno impulsado principalmente por vertimientos inadecuados de aguas residuales originados en la infraestructura de alcantarillado, sistema instaurado en el periodo hegemónico de conquista europea al continente americano (Yépez, 2022). Esta situación ha generado expansiones de las ciudades contemporáneas de forma rápida, desordenada y con una desconexión con el ámbito natural (Brundtland, 1987). A su vez la construcción de sistemas de alcantarillado ha sido insuficientes e irregulares (García, 2009) lo que resulta en la descarga directa de aguas domésticas e industriales en cuerpos de agua naturales sin ningún tratamiento ni saneamiento (Marsalek, 2002), ocasionando impactos nocivos para los ecosistemas naturales acuáticos.

Diversas estrategias integran procesos de regeneración y tratamiento del agua en distintas escalas urbanas. Sin embargo, no se aborda adecuadamente la problemática desde la prevención y políticas que mitiguen esta acción, lo que ha incrementado el vertimiento de aguas contaminadas en cuencas naturales alterando las condiciones del ecosistema. Para enfrentar este desafío, es necesario establecer procesos de desarrollo sustentable integral que protejan el medio ambiente (Güneralp, 2008) considerando que el uso del agua es fundamental para la

vida humana y numerosas actividades cotidianas. Según datos de las Naciones Unidas (2023), para el año 2025, la mitad de la población mundial podría vivir en zonas con escasez de agua potable (ONU, 2019). Esta situación se debe no solo al cambio climático, sino también a diferentes fenómenos, por ejemplo, el rápido desarrollo urbano, la contaminación ambiental, la infraestructura hídrica colapsada, el crecimiento acelerado poblacional y la mala gestión de políticas para administrar los recursos hídricos en las poblaciones contemporáneas (Galderisi, 2014).

Es por esto, que surge la necesidad de incorporar procesos de diseño, con características regenerativa que estudia el ciclo de vida, evaluación de biomateriales, recursos o herramientas que simulan condiciones ambientales (Fowler, 2014), enmarcados en metodologías que se basan en estrategias integrales con soluciones reales a problemas actuales sobre el saneamiento del agua en las comunidades contemporáneas. También se identifican materias en abundancias del territorio, en búsqueda de una gestión equilibrada en recursos y procesos de tratamientos de ciclos de vida del agua (Vezzoli, 2008). Donde es fundamental desarrollar estrategias de diseño alternativo que fomenten el desarrollo sustentable integrando oportunidades innovadoras para que la infraestructura pueda manejar los recursos hídricos. Es fundamental integrar la planificación urbana con características que mitiguen riesgos garantizando el suministro y saneamiento del agua en las comunidades (Herslund, 2019).

La protección, gestión y restauración estratégica de los sistemas naturales de las cuencas, es conocida como

infraestructura verde (Gómez, 2013). Esta aproximación implica que el diseño integra tecnologías de saneamiento descentralizadas, incluyendo estrategias como biofiltros o humedales artificiales (Gray, 2019). Estas tecnologías resultan especialmente útiles en áreas rurales y periurbanas, donde la infraestructura de servicios básicos presenta deficiencias (Gómez, 2013). Investigaciones del Instituto de Recursos Mundiales (2021) han demostrado que estas tecnologías ecológicas pueden reducir significativamente la carga contaminante y mejorar la calidad del agua local (Herslund, 2019).

La conservación de las cuencas hidrográficas es esencial para el buen funcionamiento de los sistemas de infraestructura de abastecimiento de agua en diversas poblaciones (Gray, 2019). Será necesario fortalecer las políticas y regulaciones ambientales mediante la vinculación con el sector educativo y comunitario que genere un intercambio de saberes colectivos, donde se puede informar sobre la importancia del manejo adecuado de los residuos en abundancia y la protección de los recursos hídricos, incidiendo en las prácticas a nivel comunitario.

La presente investigación se estructura en cinco capítulos que ordenan el proceso investigativo. El Capítulo 1, titulado Antecedentes “Principios básicos de tratamiento de agua contaminada con sistemas vivos”, el capítulo 2 se enfoca en el marco teórico conceptual y estudios de referencia con sistemas naturales y materiales para la biorremediación del agua. El Capítulo 3, “Estructura de investigación, bases de investigación y desarrollo del Biofiltro” correlaciona variables y métodos de estudio para explorar técnicas de

diseño y biofabricación que permitan la creación de biofiltros utilizando organismos vivos. El Capítulo 4, “Resultados, Hallazgos y aproximación. Viabilidad y degradación de Contaminantes” se presentan los resultados de validación de técnicas científicas y aplicaciones de la investigación en diversas escalas, abordando tanto el ámbito experimental como el especulativo con el objetivo de implementar estrategias sostenibles para el saneamiento y tratamiento de aguas contaminadas. Finalmente, Capítulo 5, Contiene los apéndices de “Reflexiones finales”, aprendizajes para desarrollos futuros, proyección del proyecto y anexos de ejecución del proyecto.

En la actualidad, la expansión demográfica y los patrones de consumo inducidos por el modelo de desarrollo han intensificado el uso de recursos provenientes de ecosistemas críticos para el equilibrio ambiental (Schwarzenbach, 2010). En las áreas urbanas, se consume aproximadamente el 75% de los recursos naturales y de energía a nivel global, lo que contribuye de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la degradación de los ecosistemas naturales (Schwarzenbach, 2010). Desde el inicio de la era moderna, se ha observado un incremento en la explotación de recursos fósiles para la producción de materiales y productos cotidianos (Grasham, 2019). Un caso manifiesto de este problema es el vertido de aguas residuales contaminadas derivadas de estas actividades, que afecta las vías fluviales naturales, contamina los océanos, genera un impacto negativo a la vida silvestre e incluso se infiltra en la cadena alimentaria humana (Grasham, 2019).

La era geológica actual Holoceno comenzó hace unos 11.700

ITSi

Planteamiento del problema

años después del último periodo glacial (Cearreta, 2017). Una propuesta actual por algunos autores denominada el Antropoceno, como el periodo de la historia de la tierra que se caracteriza por una influencia predominante de las actividades humanas en la biosfera del planeta (Crutzen, 2002). Este momento define la magnitud y velocidad de los cambios inducidos por el ser humano en el sistema terrestre, alterando el ciclo del carbono, la acidificación de los océanos y la pérdida de biodiversidad (Suchman, 1987). Estas transformaciones están relacionadas con el desarrollo industrial y el crecimiento demográfico, los cuales han intensificado la explotación de recursos naturales y ocasionando impactos ambientales globales (Chakrabarty, 2015). La necesidad de consumo instaurada por el modelo de desarrollo del mundo hegemónico ha llevado a una situación en la que las actividades humanas modifican significativamente los procesos ecológicos y climáticos, resultando en consecuencias profundas para la estabilidad de los sistemas naturales y la salud del planeta (Grasham, 2019).

Por esta razón, la transformación de las poblaciones y ciudades se ha visto afectadas por los procesos históricos que han marcado el desarrollo de la humanidad, el continente americano es un ejemplo actual de los procesos colonialistas del mundo hegemónico que llegó a este

hemisferio hace 500 años, el cual instauro prácticas, modelos de desarrollo, formas de pensar y habitar mediante la organización territorial en diferentes asentamientos humanos. Este desarrollo se dio en los siglos XIX y XX por los españoles, se enfocaron principalmente en desarrollar avances hidráulicos en México, en donde se buscaba lograr una mayor captación de agua por medio de diferentes técnicas. (Steffen, 2015) con el fin de expandir las tierras de cultivos y generar la energía eléctrica por todo el país. Dichos esfuerzos se han quedado cortos para la gestión y tratamiento de agua en poblaciones actuales en donde se evidencia la expansión especialmente en sus periferias, contribuyendo al asentamiento irregular y la demanda de recursos hídricos.

Estos desafíos subrayan la necesidad urgente de transformar los paradigmas de consumo y producción hacia modelos más sustentables y regenerativos tanto para la infraestructura pública como para la generación de materiales alternativos que integren características de saneamiento del agua contaminada (Rockström, 2009). La implementación de tecnologías de tratamiento ecológico y el uso de materiales biodegradables en la infraestructura urbana pueden ofrecer soluciones sostenibles para mitigar problemas referentes al acceso al agua debido a fenómenos como el crecimiento poblacional y la brecha de desigualdad, en la figura 1 se ejemplifica el proceso de proyección actual y futura sobre el acceso de agua potable y saneamiento de forma global los efectos y las implicaciones sociales derivadas de la contaminación y escasez de agua. Además, fortalece a la reflexión frente a la gestión de los recursos hídricos promoviendo prácticas de biorremediación para restaurar



Figura 1. Crecimiento Poblacional y brecha de desigualdad Fuente: El informe de la Organización Mundial de la Salud (Oms) y UNICEF de 2021

la salud de los ecosistemas acuáticos asegurando el acceso hídrico de las comunidades humanas (Beddington, 2010).

El Orden Mundial (EOM) fuente internacional clave para el análisis y la publicación de investigaciones sobre las acciones contra el cambio climático actual, menciona que, según datos del sistema mundial de información de la FAO sobre recursos hídricos y agricultura, AQUASTAT, en donde se ha registrado una reducción del 60% en la disponibilidad de agua dulce en los últimos 60 años. Datos que evidencian la insostenibilidad de las sociedades actuales subrayando y alertando la necesidad de adoptar hábitos de consumo más respetuosos con el medio ambiente y compatibles con las reservas hídricas (FAO, 2015).

Es importante destacar que según datos analizados sobre los recursos de agua dulce per cápita anuales renovable hasta el año 2020, destaca la necesidad en Latinoamérica para el saneamiento del agua y en la distribución del servicio dando accesibilidad a diferentes naciones y poblaciones mundiales a los servicios hídricos. (Fernández, 2022) Considerando la media ponderada, se estima que los países Latinoamericanos deben dedicar aproximadamente el 1.38% de su PIB anual para garantizar que el suministro de agua potable pueda llegar a diversas comunidades a nivel global (FAO, 2015). Indicando el ajuste y la inversión requerida por cada nación en el saneamiento del agua y en la distribución del servicio en donde se observa a México con un 1.56 PIB anual de inversión para garantizar el acceso del agua, pero este esfuerzo se queda centralizado en las grandes de las ciudades por la expansión y demanda (Fernández, 2022).

Es evidente que los países con menores recursos económicos y con una infraestructura menos desarrollada deberán realizar un mayor esfuerzo para garantizar el acceso en el saneamiento y gestión de agua a diferentes comunidades (Fernández, 2022). En la figura 2 se muestra como es la distribución en el mapa mundial de la disponibilidad de sistema de saneamiento, acueductos y agua potable a nivel mundial. En otras palabras, aquellos países que presentan un rezago significativo en la cobertura de servicios y una capacidad económica limitada de países de América latina, la carga mayor que enfrentaran naciones para alcanzar los estándares necesarios que den accesibilidad, cobertura de agua potable y saneamiento a diversas poblaciones urbanas y rurales que garantice sostenibilidad en el tiempo y derecho a las futuras generaciones de ecosistemas regenerados y saludables (Nagendra, 2018).

En América Latina, el fenómeno del crecimiento urbano informal se manifiesta con frecuencia en ciudades en desarrollo, caracterizado por la expansión desorganizada y la ocupación no regulada de terrenos (Grasham, 2019). Esta dinámica ha dado lugar a la proliferación de asentamientos precarios que carecen de infraestructura básica adecuada en las ciudades mexicanas (CONAGUA, 2023). La ausencia de infraestructura adecuada para la gestión de aguas residuales ha resultado en que los sistemas de alcantarillado y drenaje doméstico viertan directamente en cuerpos de agua naturales, como arroyos lagos y ríos (CONAGUA, 2023) Morelia, Michoacán, ejemplifica este problema de manera significativa (FAO, 2015). En las periferias de la ciudad, la expansión desordenada de colonias ha provocado una serie de problemas ambientales y de salud pública (Suchman,

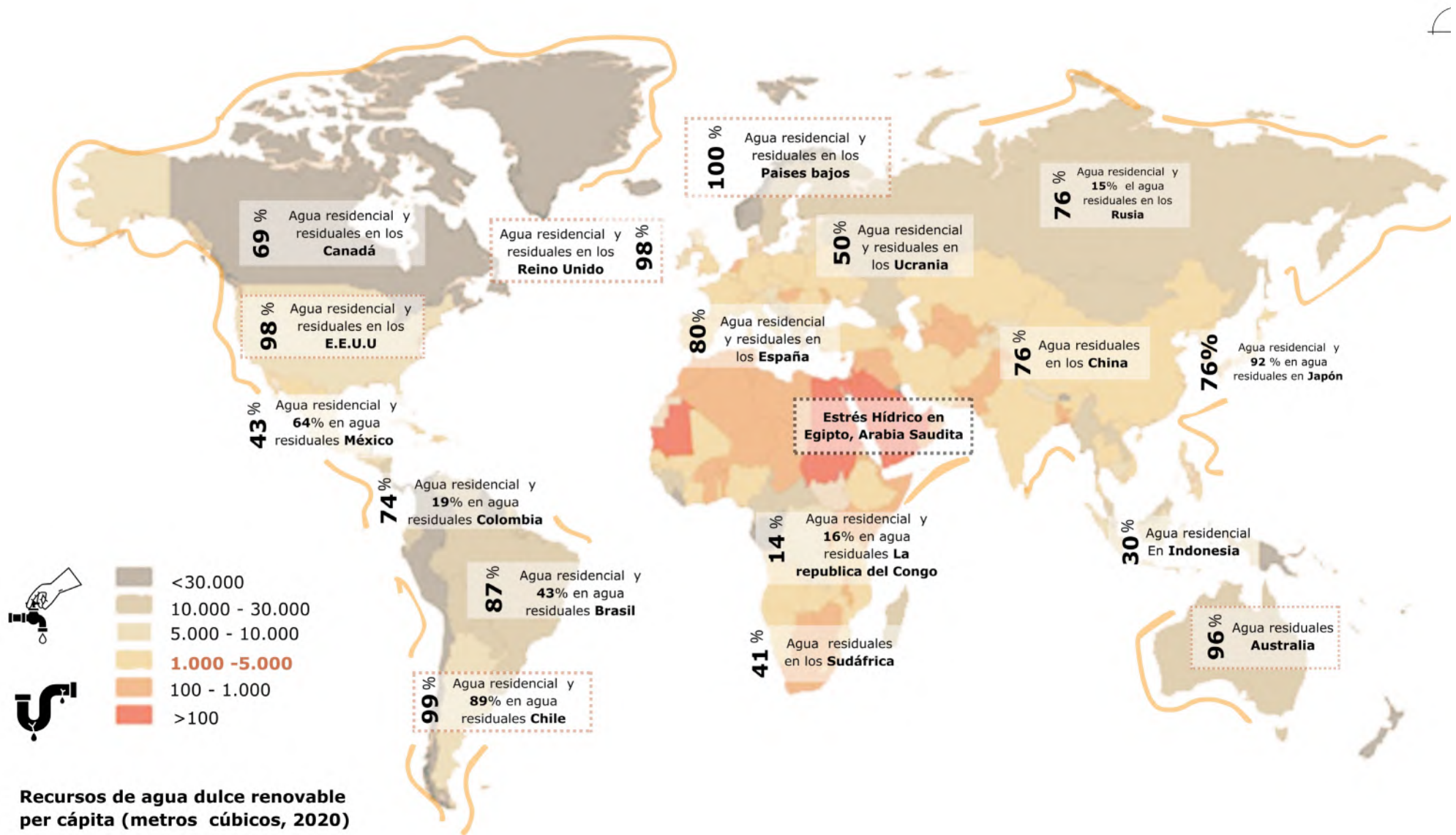


Figura 2. Mapa Disponibilidad de sistema de saneamiento y abastecimiento de agua potable a nivel mundial

1987).

Por esta razón, el vertido descontrolado de aguas residuales en los cuerpos de agua naturales de la ciudad de Morelia y periferias suburbanas ha llevado a cambios notables y a una contaminación considerable de los ecosistemas acuáticos locales. En la figura 3 se muestra como la expansión urbana incrementa la necesidad de abastecimiento de agua, las zonas de extracción del agua y las zonas de riegos de inundación por los sistemas de drenaje. De acuerdo con un informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023), cerca del 60% de los arroyos en la ciudad muestran niveles elevados de contaminantes, tales como residuos orgánicos, compuestos químicos y patógenos. Esta situación impacta negativamente en la calidad del agua, afectando la biodiversidad acuática y la salud de las comunidades que dependen de estos recursos hídricos (World Health Organization [WHO], 2019). La presencia de contaminantes puede provocar una disminución de los niveles de oxígeno en el agua, lo que puede llevar a la muerte de especies acuáticas (Smith, 1999). Por lo tanto, la implementación de soluciones de saneamiento y estrategias alternativas en búsqueda de aplicación de técnicas de biorremediación para ayudar en la restauración y protección de estos importantes ecosistemas acuáticos (Singh, 2020).

Las descargas de drenajes domésticos sin tratamiento previo en cuencas hídricas, derivadas de sistemas informales de disposición de desechos, generan un impacto negativo significativo en los ecosistemas a diversas escalas (Schwarzenbach, 2010). Este tipo de contaminación tiene un efecto devastador sobre los ecosistemas acuáticos,

alterando no solo la calidad del agua, sino también la biodiversidad de los hábitats acuáticos y los servicios ecológicos que estos brindan. Las alteraciones resultantes han tenido consecuencias graves en los contextos naturales, afectando tanto a los organismos acuáticos como a las comunidades humanas que dependen de estos recursos para el abastecimiento de agua potable y la agricultura (Garzón, 2017). La presencia de contaminantes nocivos para el consumo humano, tales como metales pesados, productos químicos industriales y compuestos orgánicos derivados de los desechos domésticos principalmente materiales como el Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Esta situación resalta la oportunidad de desarrollar estrategias de descontaminación que no solo sean eficientes, sino también sostenibles en el tiempo.

La propuesta de esta investigación se basa en el uso de métodos ecológicos que reduzcan al mínimo los impactos negativos sobre el entorno. A través de estos biofiltros, se promueve un equilibrio entre la intervención humana y la restauración de los ecosistemas. Asimismo, se evita la implementación de sustancias químicas tóxicas en la cadena de Biofabricación del biomaterial, lo que minimiza los riesgos potenciales para la salud humana. Además, el uso de materiales naturales como el micelio y la celulosa ofrece beneficios adicionales, ya que estos pueden ser utilizados para la rehabilitación de áreas degradadas y la mejora de la calidad del suelo y agua (Singh, 2020). Fomentando la regeneración de la biodiversidad en los Este apartado aborda los antecedentes históricos de comunidades antiguas del

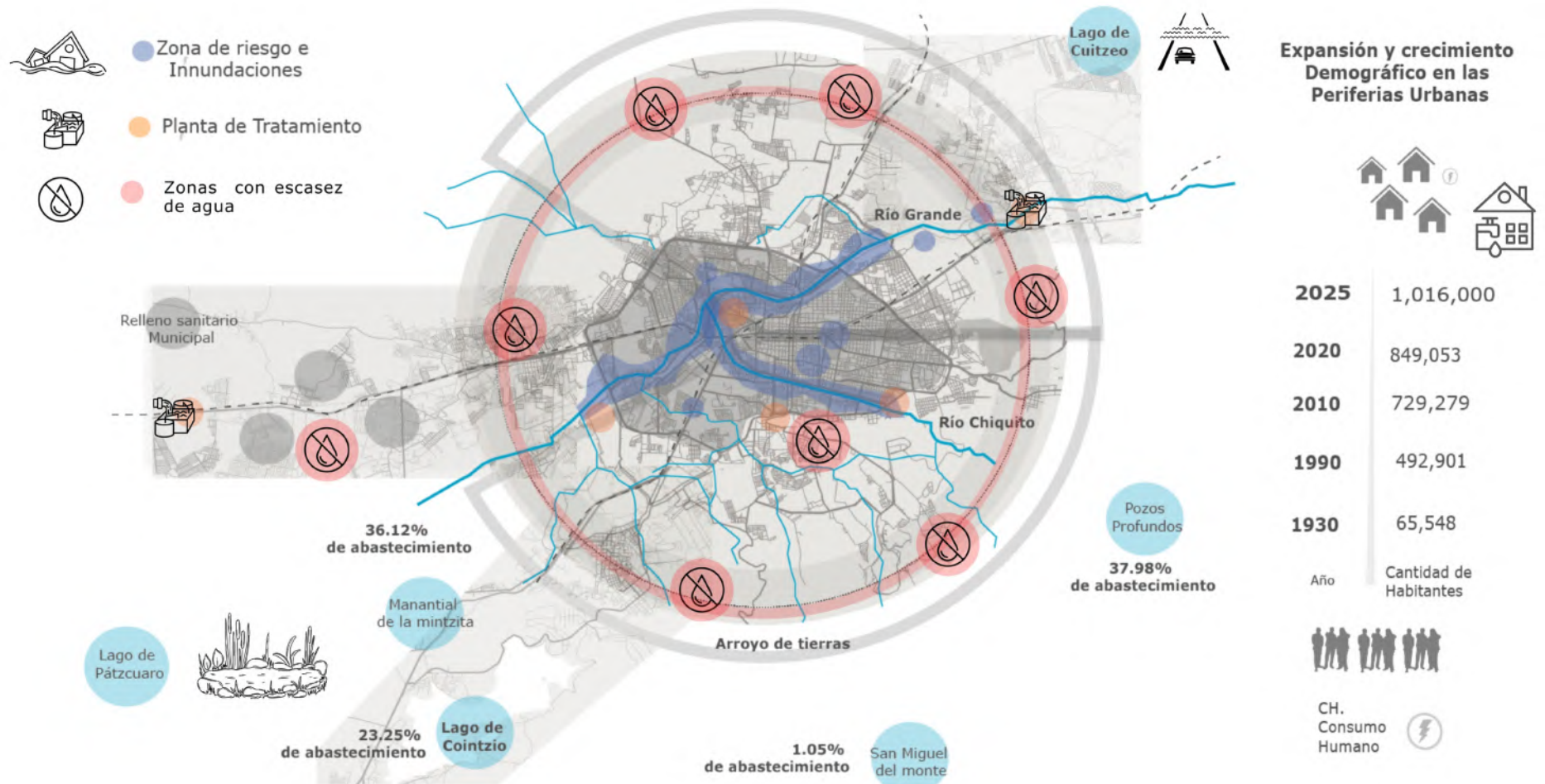


Figura 3. Mapa de la ciudad de Morelia, componentes hídricos 60% de los arroyos en la ciudad presentan niveles elevados de contaminantes

ITSi

Estrategias para disminuir contaminación del agua

Antecedentes históricos y civilizaciones antiguas:
Latinoamérica, México y Morelia

Este apartado aborda los antecedentes históricos de comunidades antiguas del continente americano con énfasis en la cultura Inca y el conocimiento andino y prehispánico relacionado con el manejo del agua. La figura 4 muestra los desarrollos ingenieriles en los casos de Nasca, Machu Picchu y Moray. Los estudios realizados por científicos e ingenieros, mediante el uso de técnicas no invasivas, permitieron identificar aspectos del diseño y la construcción de canales y terrazas (Ponce, 2015). Estos análisis ampliaron la comprensión sobre las cualidades y la distribución espacial de dichas infraestructuras, lo que contribuye al conocimiento de las técnicas hidráulicas utilizadas por estas culturas y su relación con procesos históricos vinculados al cambio climático.

Las morfologías de las ciudades antiguas estuvieron condicionadas por factores ambientales y físicos. Las zonas de asentamiento se ubicaban en territorios con una configuración geográfica irregular y estaban expuestas a períodos de precipitaciones intensas o bajas, lo que influía en las áreas destinadas al cultivo (Ponce, 2015). En este contexto, la distribución del agua y el papel que desempeñaron los sistemas subterráneos de filtración y los manantiales resultan fundamentales para el abastecimiento de agua, el funcionamiento de los sistemas de alcantarillado y la construcción de drenajes en terrazas agrícolas o andenes. Estas terrazas estaban conformadas por tres capas: una superior de materia vegetal; una intermedia compuesta por distintos tipos de gravilla, piedras finas y arena; y una capa profunda integrada por piedras grandes (Carlotto, 2009). Esta disposición permitía que una parte del agua de lluvia se retuviera en la capa superficial, humedeciendo las raíces y las especies vegetales. A través del proceso de evapotranspiración, el agua se filtraba lentamente hacia la capa de gravilla y descendía hasta las piedras grandes, facilitando su conducción hacia el interior de la montaña o hacia niveles inferiores. De acuerdo con Wright y Valencia (2009), aproximadamente el 60 % del esfuerzo de construcción de la ciudadela se concentró en trabajos de estabilización, incluidos los sistemas de drenaje, lo cual refleja una comprensión integral de las dinámicas ecosistémicas, aún vigentes en el estudio de las ciudades antiguas.

Dentro de las prácticas tradicionales de gestión hídrica, destacan las desarrolladas por las comunidades mesoamericanas, particularmente en la península de

Yucatán. Las antiguas poblaciones mayas desarrollaron sistemas para almacenar y distribuir agua a lo largo del año, mediante embalses destinados a la recolección de agua de lluvia. Estas infraestructuras fueron construidas principalmente en zonas elevadas, desde donde el agua era canalizada hacia áreas de riego a través de sistemas hidráulicos. Una parte significativa de la precipitación se infiltraba en el suelo, generando arroyos y cauces que, en muchos casos, desaparecían bajo la superficie (Carlotto, 2009). Esta dinámica está estrechamente vinculada con la morfología geológica de la región, caracterizada por un extenso sistema de aguas subterráneas asociado al impacto de un meteoro ocurrido hace aproximadamente 65 millones de años (León, 1992). La relación de estas comunidades con el agua no era solo funcional, sino también simbólica. En la cosmovisión mesoamericana, el agua era comprendida como un sistema vivo, esencial para la existencia, que provenía del cielo y nutría los campos, ríos y cosechas. Se le atribuía un carácter sagrado, integrándola como un componente fundamental en la comprensión del universo. Como señala Vargas (2024), el agua no solo formaba parte del equilibrio vital, sino que se concebía en conjunto con los cuatro elementos: fuego, aire, tierra y agua. Bajo esta perspectiva, el ser humano era considerado parte de la naturaleza, y su relación con ella implicaba la responsabilidad de retribuir en la medida en que se beneficiaba de sus recursos.



Figura 4. Sistema de acueductos de Machupichu, Incas Siglo V

ITSi

Dependencia histórica de las civilizaciones mesoamericanas de los humedales en contraste con el gestión de red de agua contemporánea

Desde épocas prehispánicas, las grandes civilizaciones mesoamericanas estuvieron íntimamente vinculadas a sus ecosistemas acuáticos (León, 1992). Los aztecas desarrollaron un sofisticado sistema hidráulico en la Cuenca del Valle de México, aprovechando lagos y chinampas para el autoconsumo y la agricultura urbana, lo que impulsó su crecimiento demográfico y urbano. En tanto, los mayas utilizaban cenotes cársticos como fuente de agua potable y espacios ceremoniales de gran relevancia cultural (León, 1992). Esta relación histórica subraya el papel fundamental que desempeñan los humedales en el desarrollo de las sociedades humanas y su vínculo con el territorio, la economía y la identidad cultural.

Entre las acciones e intervenciones realizadas por las comunidades del centro del territorio mexicano, destaca el esfuerzo asociado a la construcción y expansión de Teotihuacán, cuya población, hacia el siglo V d.C., se estima en más de 70,000 habitantes, con base en la extensión y estructuración de su trazo urbanístico, que abarcaba cerca de 30 km². En este contexto, se implementó un sistema de canales para la distribución del agua, aprovechando las corrientes del río San Juan (León, 1992). Mediante el uso de chinampas estructuras formadas por arzones de varas, ramas de árboles y tierra vegetal se logró establecer una estrategia de cultivo en zonas de inundación. Estas plataformas permitían la hidratación constante del sustrato por medio de la filtración del agua de los lagos, lo que facilitaba el desarrollo de cultivos diversos, como verduras y flores. Las cosmovisiones culturales desempeñaron un papel fundamental en la organización de estas poblaciones del centro de Mesoamérica. Afirmaciones mencionadas por

León en 1992 señalan que la elección de ubicar la ciudad de Teotihuacán en el centro del sistema lacustre respondía a una concepción espiritual, en la que la ciudad debía rendir culto a Tláloc, dios de la lluvia, junto al dios protector de los mexicas (León, 2009). Esto pone en evidencia los rasgos culturales y cognitivos de estas poblaciones antiguas, estrechamente vinculadas con los procesos de gestión hidráulica.

En las culturas tradicionales purépechas de Michoacán se reconocen formas de organización comunitaria orientadas al manejo del agua, así como la identificación de fenómenos asociados a la escasez, contaminación y deterioro de las fuentes de abastecimiento. Hacia mediados del siglo XV, en la ribera del lago de Pátzcuaro, distintos grupos humanos establecieron sistemas de saberes y creencias vinculados a prácticas de uso respetuoso y equilibrado de los recursos naturales en sus territorios (Argueta, 2008). La laguna adquirió un valor simbólico dentro del sistema de conocimiento y creencias, al tiempo que se transmitía un sentido de pertenencia asociado a formas de existencia en relación con los elementos naturales. Por su parte, la implementación de estrategias como pozas de sedimentación y humedales artificiales en la zona lacustre impulsó el diseño y uso de tecnologías adaptadas al entorno (Soares, 2007). En las culturas tradicionales purépechas de Michoacán se reconocen formas de organización comunitaria orientadas al manejo del agua, así como la identificación de fenómenos asociados a la escasez, contaminación y deterioro de las fuentes de abastecimiento. Hacia mediados del siglo XV, en la ribera del lago de Pátzcuaro, distintos grupos humanos establecieron sistemas de saberes y creencias

vinculados a prácticas de uso respetuoso y equilibrado de los recursos naturales en sus territorios (Argueta, 2008). La laguna adquirió un valor simbólico dentro del sistema de conocimiento y creencias, al tiempo que se transmitía un sentido de pertenencia asociado a formas de existencia en relación con los elementos naturales. Por su parte, la implementación de estrategias como pozas de sedimentación y humedales artificiales en la zona lacustre impulsó el diseño y uso de tecnologías adaptadas al entorno (Soares, 2007).

En contraste, la cosmovisión occidental hegemónica introducida tras la conquista americana en el siglo XV presenta un enfoque distinto respecto al agua, al concebirla principalmente como un recurso utilitario y de servicio. Esta perspectiva implica que el agua es vista como un insumo destinado a satisfacer las necesidades humanas y a ser explotado para actividades cotidianas (Argueta, 2008). Ver figura 5, en la que se observa cómo la gestión y acceso al agua de comunidades prehispánicas en el siglo xx. Esta visión tiende a entender la naturaleza como una entidad separada de la humanidad, en lugar de una red interconectada y viva. Se trata de una postura antropocéntrica, en la que las necesidades humanas se colocan como eje central en los procesos de gestión del agua (Broda, 2001).

Desde la segunda mitad del siglo XX, la contaminación del agua se ha convertido en una preocupación creciente en Latinoamérica. El acelerado crecimiento industrial y urbano ha incrementado la carga de contaminantes en las fuentes hídricas (Rodríguez, 2019). Para enfrentar esta problemática, se han desarrollado diversos enfoques, entre



Figura 5. Transporte de agua potable a comunidades prehispánicas en el siglo xx

ellos la regulación gubernamental, la implementación de tecnologías para el tratamiento del agua y la promoción y divulgación de prácticas orientadas a la sustentabilidad (García, 2021).

En México, los esfuerzos para reducir la contaminación del agua se intensificaron a partir de las décadas de 1970 y 1980, con la creación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 1989, encargada de la gestión y conservación de los recursos hídricos (González, 2016). En las últimas décadas, México ha adoptado diversas tecnologías y enfoques, tales como plantas de tratamiento de aguas residuales, normativas ambientales más estrictas y programas de concientización pública (Garzón, 2017). A lo largo de las últimas décadas, se han implementado diversas estrategias para mitigar la contaminación en los cuerpos de agua, destacando entre ellas la biorremediación (Meza, 2020).

La evolución del acueducto y las redes de drenaje por ejemplo en la ciudad de Morelia refleja procesos de transformación urbana de la ciudad, desde su fase colonial hasta su desarrollo moderno (González, 2016). Con la construcción del acueducto, fue necesario diseñar redes de drenaje que permitieran recolectar las aguas en las ciudades, esta estructura de distribución del espacio queda colapsada con fenómenos naturales cambiantes en los asentamientos urbanos. Según González (2016), la adaptación de las redes de drenaje ha sido esencial para manejar el crecimiento urbano y las nuevas exigencias de la infraestructura, especialmente en áreas que antes no estaban urbanizada, Un estudio reciente sobre la infraestructura de drenaje en Morelia indica que, a lo

largo de las últimas décadas, se han invertido recursos significativos en la actualización y expansión de las redes de drenaje para adaptarse a las demandas crecientes (González, 2016). Este esfuerzo incluye la incorporación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales y la gestión sostenible de los recursos hídricos, lo cual es necesario para enfrentar los retos del crecimiento urbano de asentamientos contemporáneos.

En consecuencia, la capital del estado de Michoacán, Morelia ha enfrentado desafíos significativos relacionados con la contaminación de sus cuerpos de agua, como el río Chiquito y el Lago de Cuitzeo (López, 2019). Las autoridades locales y organizaciones no gubernamentales han desarrollado proyectos de saneamiento y restauración ecológica, explorando técnicas como la biorremediación, que utiliza organismos vivos para eliminar o neutralizar contaminantes (Medina, 2006). La biorremediación tiene características para ser eficaz y sostenible (Brenes, 2024). En la década de 1980, Morelia empezó a explorar la biorremediación como alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas por procesos biológicos de filtración en plantas de tratamiento de Aguas residuales de Atapaneo (López, 2019). Otra situación frecuente en temporadas de lluvias, son las inundaciones en zonas de alto riesgo de creciente de ejes naturales de agua como el río Chiquito y río grande. Estos estudios iniciales demostraron el potencial de procesos para la integración de las bacterias y otros microorganismos para degradar contaminantes (Cárdenas, 2025)

Durante la década de 1990, se llevaron a cabo proyectos

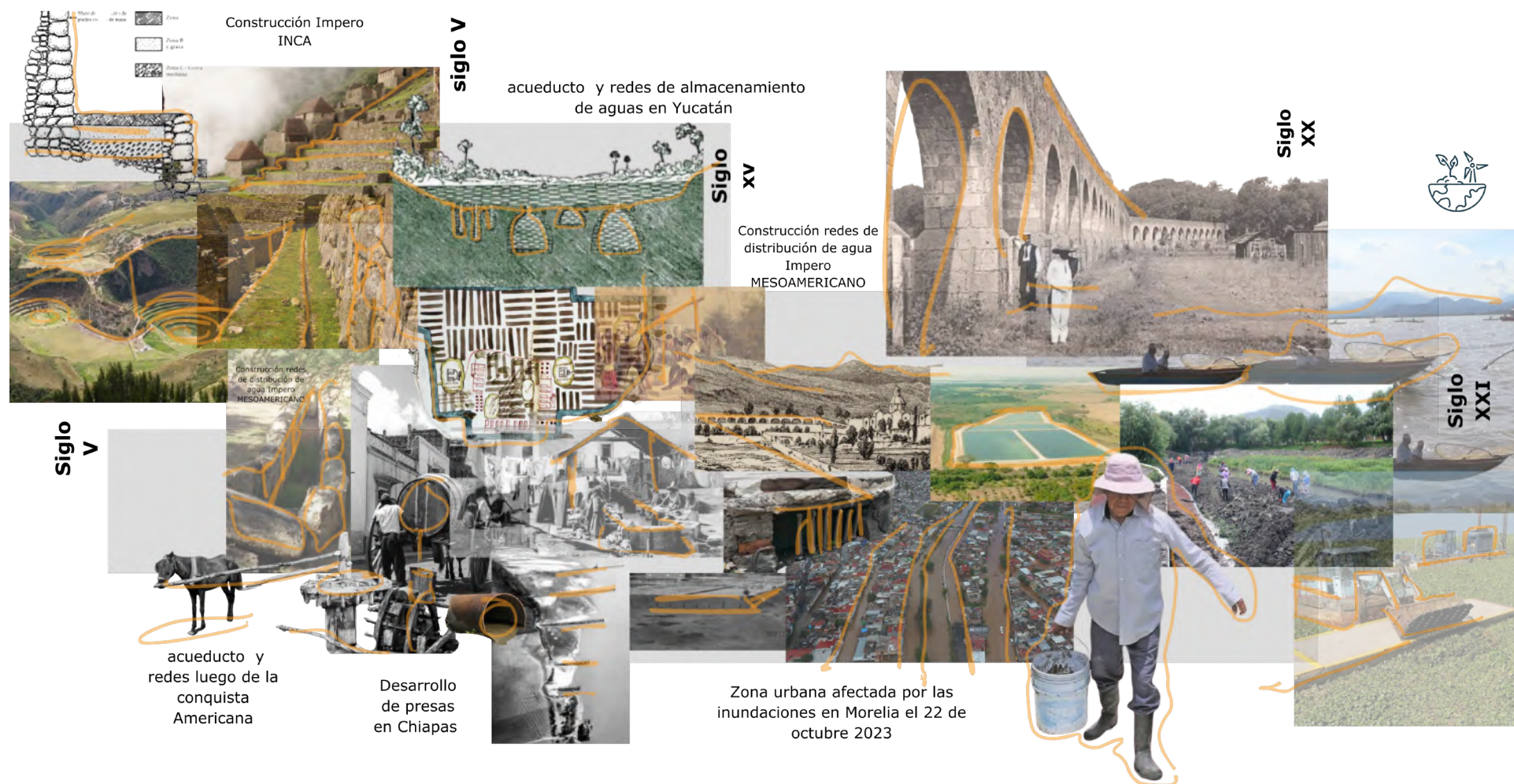


Figura 6. Línea del tiempo Construcción, desarrollo de acueducto y drenaje

piloto orientados a evaluar la eficacia de la biorremediación en contextos locales y municipales, identificando bacterias como una estrategia viable para el tratamiento de contaminantes, tales como hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles presentes en aguas residuales industriales y municipales (González, 2016). Iniciativas de este tipo han sido desarrolladas por BIOBOX en España, mediante la construcción de plantas de tratamiento y la implementación de enfoques dirigidos a la reducción de contaminantes. Estas aplicaciones, según su escala, se basan en el diseño de filtros con relleno de arcilla expandida, material que presenta propiedades de porosidad, resistencia y adecuado desempeño hidráulico (Biobox, 2025).

En México se han desarrollado procesos orientados a la remediación de las condiciones del agua en zonas aledañas al lago de Pátzcuaro. Un caso de estudio relevante es el de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Francisco Pichátaro, Michoacán, donde se han aplicado prácticas verdes en el tratamiento de aguas residuales, incluyendo el reciclaje de residuos de aguacate para el desarrollo de bioadsorbentes (Orozco, 2024). En el municipio considerado, los residuos de aguacate representan 34 toneladas métricas por día, lo que ha permitido optimizar los recursos hídricos mediante el uso del flujo de permeado en procesos agrícolas, como sistemas de riego en invernaderos, cultivo de especies forestales, viveros y huertos residenciales.

Uno de los principales resultados del estudio fue el diseño de procesos avanzados de oxidación como la fotocátalisis homogénea y heterogénea integrados con tratamientos biológicos y térmicos para la regeneración de bioadsorbentes

de carbón activado. Estos procedimientos contribuyeron a la disminución de los valores de los parámetros del índice de calidad del agua, abriendo la posibilidad de integrar materia orgánica regional con características adecuadas para favorecer la articulación y proliferación de microorganismos.

Para finalizar se recolecta momentos históricos de la alteración de los ecosistemas, en la Figura 6 se muestra cronológicamente la transformación y la continua adopción de prácticas en el continente Americano realizando énfasis en los sistemas para el tratamiento y gestión hidrográfica de comunidades urbanas y rurales, esta búsqueda se inició rastreando los ejemplos de las comunidades antiguas precolombinas existentes hasta el desarrollo contemporáneo, en donde se identifican fenómenos y estrategias para remediar y las características para la gestión de hídrica, garantizado situar el proyecto en una problemática real que enfrenta la especie humana (Orozco, 2024). Estas referencias generan la oportunidad para la integración de prácticas alternativas e innovadoras referente a la crisis de la contaminación de ecosistemas acuáticos vitales para el desarrollo de poblaciones aledañas a cuencas hídricas, entendiendo inicialmente la forma como las comunidades antepasadas se relacionaban con el contexto y con el suministro del agua, nos dará oportunidades mas respetuosas para el tratamiento del agua.

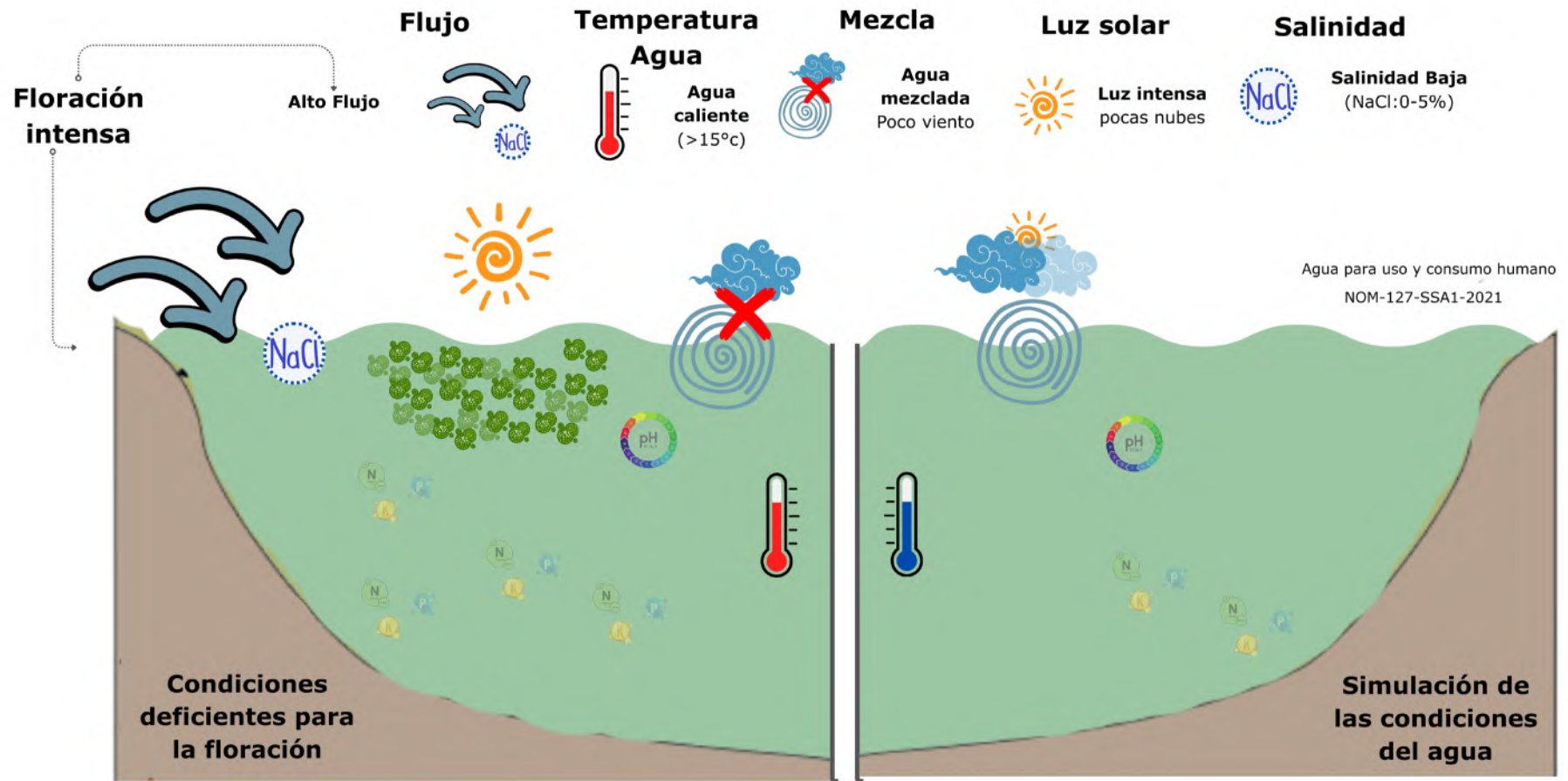


Figura 7. Tipos de contaminación agua potable, Recuperadode: World Health Organization (WHO). (2020). Guidelines for drinking-water quality. (4th ed.). Riesgos potenciales de cáncer, problemas gastrointestinales.

ITSi

Aguas Contaminadas

Las aguas residuales urbanas generadas por las actividades humanas en la ciudad de Morelia, Michoacán, presentan una variedad de contaminantes que deterioran la calidad del agua, en donde se encuentran materiales como el Nitrógeno, el Fósforo y Potasio, la presencia en exceso de estos componentes genera procesos de eutrofización en el agua, en la figura 7 se muestra la caracterizado por cambio físicos y químicos, este proceso se caracteriza por tener presencia de materiales contaminantes que alteran los ecosistemas acuáticos generando algas y microbios lo que generan malos olores, cambio de color y presencia de patógenos perjudiciales para la salud humana. Esto a causa de fuentes contaminantes como la industria, la agricultura y el tratamiento deficiente de aguas residuales domésticas (Sánchez, 2022).

El Nitrógeno es uno de los principales contaminantes en las aguas residuales urbanas debido a la actividad humana. En Morelia, el Nitrógeno proviene principalmente de fuentes como los fertilizantes agrícolas, las aguas residuales domésticas y las descargas industriales. El nitrógeno en sus formas de amoníaco (NH_3), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) es un contaminante crítico que, cuando

se encuentra en concentraciones altas, puede contribuir a la eutrofización de los cuerpos de agua y causar graves impactos ambientales, como la disminución de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad. Según un estudio realizado por Sánchez el (2022), las concentraciones de nitrógeno total en las aguas residuales de Morelia oscilan entre 20 y 40 mg/L, niveles superiores a los recomendados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 en donde se establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales con un máximo de 10 mg/L para este contaminante en aguas de tipo residual. El nitrógeno tiene efectos directos sobre la salud humana. La ingesta excesiva de nitratos en el agua potable puede causar condiciones que afectan la capacidad de la sangre para transportar oxígeno (Camargo, 2024).

El fósforo, particularmente en forma de fosfatos (PO_4^{3-}), es otro contaminante predominante en las aguas residuales de Morelia, generado principalmente por las actividades agrícolas y los detergentes. La presencia de fósforo en grandes cantidades en cuerpos de agua favorece la proliferación de algas, fenómeno conocido como eutrofización. Esta condición deteriora la calidad del agua, reduce el oxígeno disponible para otras especies acuáticas y altera los ecosistemas acuáticos, afectando la biodiversidad. Según un informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019), las concentraciones de fósforo en las aguas residuales de Morelia frecuentemente superan los 3 mg/L, superando el límite recomendado por la NOM-001-SEMARNAT-1996, que es de 0.5 mg/L para aguas residuales tratadas. Estos altos niveles de fósforo contribuyen a la contaminación de los ríos y lagos cercanos, generando un

aumento en los problemas de calidad del agua. El control de fósforo en las aguas residuales es crucial para prevenir los efectos de la eutrofización. En este sentido, la normativa mexicana establece límites estrictos para la cantidad de fósforo que puede ser vertida al medio ambiente, con el fin de preservar la calidad de los cuerpos de agua y proteger la salud de las personas que dependen de estos recursos para su consumo (Sánchez, 2022).

El Potasio es otro contaminante que, aunque no es tóxico en concentraciones comunes, puede contribuir a la dureza del agua, lo que afecta el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de agua y la calidad del agua potable. En Morelia, el Potasio proviene de fuentes naturales, pero también de las actividades humanas, como el uso de productos industriales y domésticos. Las aguas residuales de la ciudad presentan concentraciones de Potasio que varían entre 50 y 100 mg/L, según los estudios realizados por Hernández et al. (2021). Aunque no existe una normativa específica sobre la cantidad de potasio en las aguas residuales, su presencia en concentraciones altas puede dificultar el tratamiento del agua para consumo humano, pues contribuye a la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento y en las redes de distribución. El potasio, junto con otros minerales como el magnesio, determina la dureza del agua, la cual es importante para la calidad del agua potable (Hernandez, 2021).

La NOM-001-SEMARNAT-1996, que regula el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua, es la norma clave en la legislación mexicana para controlar los contaminantes presentes en las aguas residuales y prevenir su impacto en

las cuencas hídricas. Una de las principales preocupaciones en la gestión del agua en México, debido a su impacto en la calidad del recurso hídrico y en la salud pública (García, 2020). En este contexto, la normativa mexicana establece una serie de reglas y principios que deben cumplirse para garantizar que las aguas residuales tratadas no afecten negativamente los ecosistemas acuáticos ni la disponibilidad de agua potable a futuras generaciones.

A pesar de la existencia de normativas como la NOM-001-SEMARNAT-1996, la implementación efectiva de estas reglas presenta varios desafíos. En diversas regiones de México, incluyendo áreas cercanas a cuencas hídricas importantes como los ríos, lagos, arroyos y los sistemas de tratamiento de aguas residuales son insuficientes o inadecuados, lo que dificulta el cumplimiento de los estándares establecidos por la norma. Según un estudio de García et al. (2020), solo el 45% de las aguas residuales generadas en zonas urbanas del país reciben tratamiento adecuado, lo que implica que una gran parte de las aguas residuales son vertidas sin cumplir con los límites de contaminantes establecidos, afectando las cuencas hídricas, alterando los ecosistemas acuáticos y ciclos de vida del agua.

El incumplimiento a la norma de vertimiento de aguas residuales no solo perjudica la calidad del agua, sino que también incrementa los costos de tratamiento de agua potable en las ciudades. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019) menciona que, a pesar de los esfuerzos por mejorar la infraestructura de saneamiento, la cobertura de redes de tratamiento de aguas residuales sigue siendo deficiente, especialmente en áreas rurales y semiurbanas,

donde las cuencas hídricas reciben grandes volúmenes de aguas residuales sin tratar (García, 2020). Además, la falta de capacitación y recursos en los municipios para monitorear y aplicar las normativas de calidad del agua es otro desafío importante. De acuerdo con el informe de (Vargas, 2018), los gobiernos locales enfrentan dificultades para llevar a cabo la vigilancia efectiva de las redes de saneamiento, lo que permite que se produzcan vertimientos ilegales o no controlados a las cuencas hídricas.

Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2021), la exposición a aguas contaminadas puede causar enfermedades gastrointestinales, infecciones y otros problemas de salud, especialmente en comunidades que dependen de los cuerpos de agua contaminados para su abastecimiento de agua potable. Además, los vertimientos de aguas residuales sin tratar alteran el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, afectando la fauna y la flora (CONAGUA, 2019). La contaminación por nutrientes, como el exceso de nitrógeno y fósforo, contribuye al crecimiento desmedido de algas en los cuerpos de agua, lo que provoca la disminución de oxígeno y afecta la biodiversidad acuática (Ceballos, 2019). Este fenómeno no solo perjudica la calidad de los ecosistemas acuáticos, sino que también impacta la economía local, especialmente en áreas dependientes de la pesca y el turismo (García, 2020).

Las descargas de drenajes domésticos sin tratamiento previo en cuencas hídricas, derivadas de sistemas informales de disposición de desechos, generan un impacto negativo significativo en los ecosistemas a diversas escalas (Schwarzenbach, 2010). Las alteraciones

resultantes han tenido consecuencias significativas en los contextos naturales (Garzón, 2017). En respuesta, este estudio propone la implementación de estrategias de biorremediación utilizando microorganismos, como los hongos, en los ecosistemas con cuencas hídricas naturales, ubicado en zonas suburbanas, específicamente. En donde se explora la posibilidad de desarrollar hábitats regenerativos que restauren ciclos de vida del agua, mediante la generación de biofiltros orgánicos a partir del crecimiento del micelio y fibras naturales en abundancia. Articulando diversos métodos para investigar alternativas sustentables que minimicen impactos nocivos en el entorno, ofreciendo propiedades de diseño regenerativas para los ecosistemas

Se hace evidente que la presencia de contaminantes como Nitrógeno, Fósforo y Potasio en las aguas residuales de Morelia, representan una oportunidad para el desarrollo de este estudio. La relación entre estos contaminantes y la calidad del agua resalta la importancia de entender cómo sus concentraciones de contaminantes (ver la Figura 8), en donde se identifican cada contaminante y los productos utilizados en las actividades humanas que afectan los ecosistemas acuáticos y la salud pública. Al analizar los ciclos de vida del agua y los procesos naturales de depuración, se puede identificar cómo estos contaminantes alteran el equilibrio ecológico y las capacidades de los cuerpos de agua para regenerarse. La biorremediación, al aprovechar microorganismos y procesos biológicos para reducir o eliminar estos contaminantes, se presenta como una solución sustentable para restaurar la calidad del agua y mitigando efectos negativos derivados de las actividades humanas.

El agua potable puede contener una variedad de contaminantes orgánicos y químicos que afectan su calidad y seguridad.



Figura 8. Tipos de contaminación agua potable, Recuperadode: World Health Organization (WHO). (2020). Guidelines for drinking-water quality. (4th ed.). Riesgos potenciales de cáncer, problemas gastrointestinales.

ITSi

Métodos para la caracterización del agua.

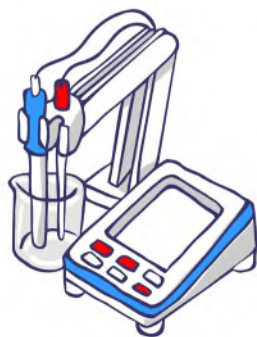


Figura 9. Métodos para la caracterización del agua, las técnicas espectrométricas para la cuantificación de los parámetros de calidad del agua

Esta sección contiene las definiciones y expone las técnicas y su aplicación en estudios afines al presente en el cual se integra las técnicas espectroscópicas y técnicas espectrofotométricas que permiten estudiar diversos componentes y estado de una muestra de agua, en la figura 10 se exponen a detalle las celdas de estudio empleadas en cada técnicas en donde se emplea diversas variables de estudio y equipos de lectura de propiedades del agua, para este estudio la implementación de parámetros que se estudien la caracterización del agua y la cantidad de materiales presentes en el agua como Nitrógeno Amoniacal (N-NH_4^+), nitrógeno (N), Fosfato en forma de Ortofosfato (P-PO_4^{3-}), potencial hidrógeno (pH) conductividad (μ/cm) y Sólidos Disueltos Totales (TDS) son elementos presentes a en las muestras de agua.

Técnicas como La Espectroscopia de Impedancia ha ganado reconocimiento como un método eficaz para monitorear e investigar las propiedades eléctricas y dieléctricas involucradas en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Mortadi, 2018). Sin embargo, su aplicabilidad se extiende más allá del tratamiento de aguas residuales y encuentra un uso valioso en diversos campos. Existen estudios previos sobre la aplicación de la EIS en el estudio de aguas residuales. En su estudio, Motardi et al., (2018) desarrollaron un sistema de monitoreo en tiempo real permitiendo realizar un sistema optimizado para el estudio d aguas residuales. Esta técnica consiste en medir la impedancia eléctrica de las aguas residuales para comprender mejor su composición y la eficiencia del tratamiento, proporcionando datos en tiempo real que pueden contribuir a la optimización del proceso (Mortadi,

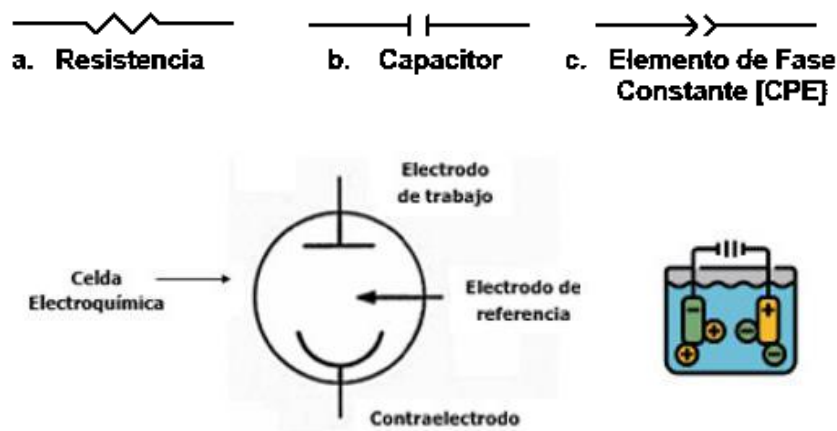


Figura 10. Celda de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y elementos pasivos

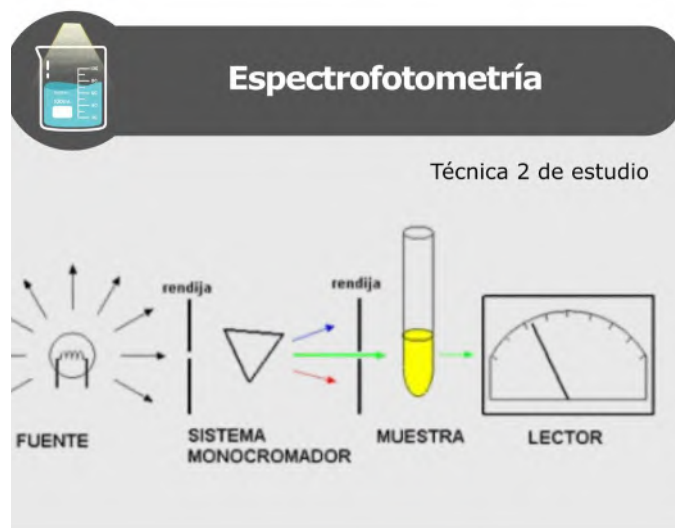


Figura 11. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría

2018). en la figura 11 se muestra la celda de medición empleada en la técnica.

La espectroscopia fotométrica se ha consolidado como otra técnica empleada para identificar las variables y los cambios en el proceso de tratamiento del agua. La técnica Fotométrica UV Visible, es una herramienta clave en el monitoreo y análisis de aguas contaminadas, debido a su capacidad para detectar compuestos químicos a concentraciones muy bajas (Brito, 2014). En la Figura 10 se muestra como esta técnica se basa en la interacción de la luz con la materia, lo que permite identificar y cuantificar diversas sustancias presentes en el agua mediante la medición de la absorbancia o transmitancia de luz a diferentes longitudes de onda. Es particularmente útil para determinar la presencia de metales pesados, nutrientes como nitratos y fosfatos, compuestos orgánicos e incluso colorantes industriales (Li, 2020), esta técnica por sus características es aplicable al estudio por los materiales contaminantes presentes en el agua de estudio.

Uno de los usos más comunes de la Espectroscopía UV-Vis ultravioleta en aguas residuales es la medición de la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total y fósforo total, parámetros fundamentales para evaluar la carga orgánica y eutrofización del cuerpo de agua. En la figura 11 se muestran las determinaciones para realizar a partir de reacciones colorimétricas en las que los contaminantes reaccionan con reactivos específicos, generando un color cuya intensidad se correlaciona con la concentración del analito (Brito, 2014). La precisión de esta técnica depende de variables como la longitud de onda seleccionada, el tiempo de reacción, la temperatura y la

turbidez de la muestra.

Otra técnica ampliamente utilizada es la Espectroscopía de Absorción atómica (AAS), empleada para la detección de metales pesados como plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y arsénico (As), los cuales representan una amenaza significativa para la salud humana y el medio ambiente. Ver la figura 12 en donde se muestra la cenda de la técnica que se basa en la absorción de luz por átomos libres en estado gaseoso, y permite obtener resultados rápidos y específicos. Las variables críticas que se controlan en este tipo de análisis incluyen la temperatura del horno de grafito, la longitud de onda específica para cada metal y la matriz de la muestra, ya que puede interferir con la lectura (Zhou, 2018).

Finalmente, la espectroscopía de fluorescencia ha demostrado ser una técnica sensible y no destructiva para la identificación de compuestos orgánicos complejos, como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y contaminantes emergentes, incluidos productos farmacéuticos y de cuidado personal. Ver en la figura 13 en donde se muestran estos compuestos emiten fluorescencia al ser excitados por una fuente de luz específica, lo que permite su detección a niveles de trazas. Variables como el pH, la intensidad de la fuente de excitación y la interferencia de materia orgánica disuelta afectan significativamente la sensibilidad y especificidad del análisis (Cai, 2018).

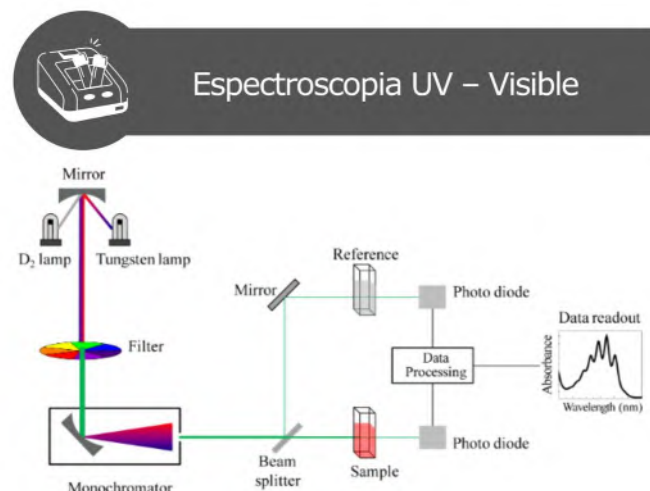


Figura 12. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría UV-visible

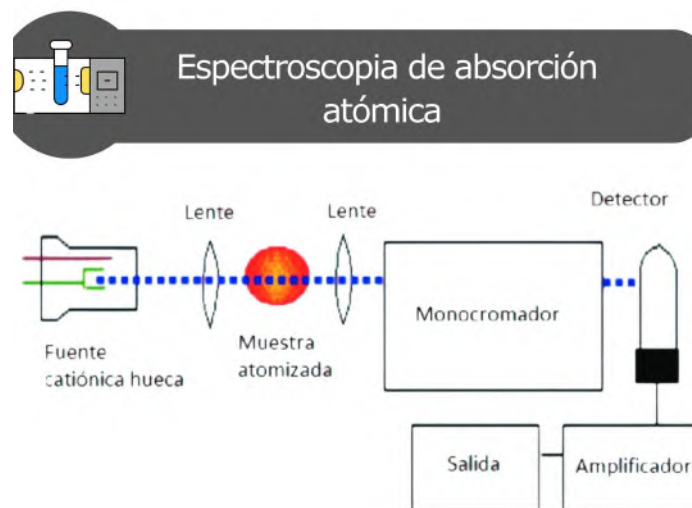


Figura 13. Métodos para la caracterización del agua, Espectrofotometría de absorción atómica



Marco

Teórico Conceptual

Estudios de referencia con sistemas naturales y materiales para biorremediación del agua y estructura de investigación

Hábitat regenerativo Biorremediación



El Capítulo 2 titulado “**Estudios de referencia con sistemas naturales y materiales para la biorremediación del agua**” introduce los fundamentos conceptuales referente a la situación actual real del problema, se articula el estado del arte y de referencia en donde se exponen los diferentes proyectos que han abordado el tratamiento de aguas con sistemas vivos principalmente con los hongos, sus propiedades para la biorremediación, los diferentes ecosistemas naturales que depuran la contaminación del agua y las bases que articulan el Diseño Regenerativo como una práctica para particular variables reales de situaciones globales como lo es la gestión del agua.

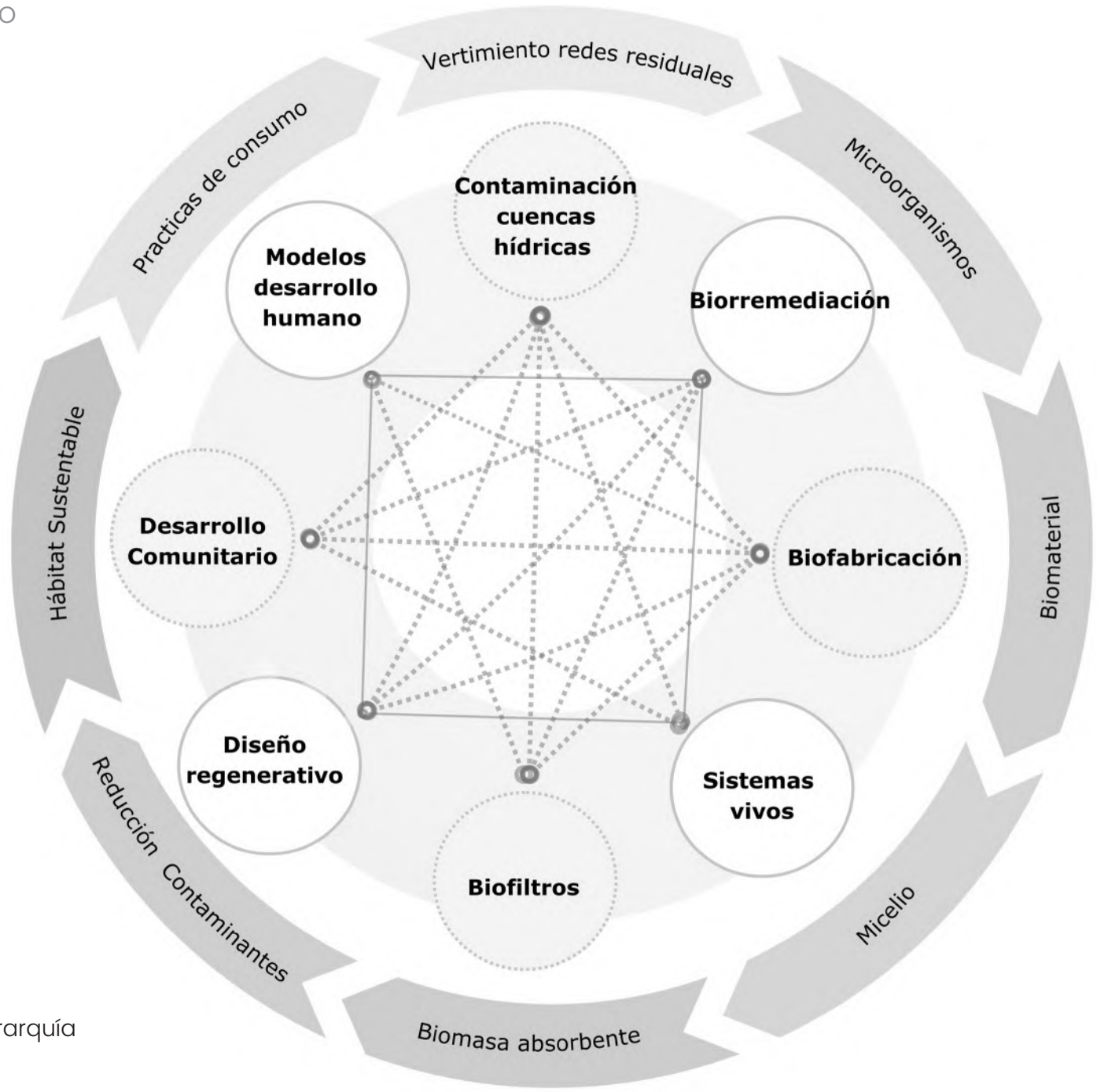


Figura 14. Esquema de jerarquía conceptual

Marco

Teórico Conceptual

Este estudio traza un marco conceptual que guía el análisis a través de diversas perspectivas para comprender y abordar el objeto de estudio. Se inicia con la identificación de modelos de consumo y la forma como han contribuido al aumento de la contaminación ambiental, principalmente al vertimiento de aguas residenciales en cuencas hídricas sin tratamiento adecuado. Con el objetivo de mitigar esta problemática, se articulan estrategias de diseño hacia la biorremediación centradas en enfoques de desarrollo sustentable, con la finalidad de regenerar ciclos de vida del agua por medio de la Biofabricación de biofiltros de micelio, aplicaciones y alternativas que se integren en hábitats, ver en la figura 14 en donde se disponen los conceptos clave y la jerarquía de desarrollo del estudio para esclarecer los conceptos que estructuran el proyecto.

En primer lugar, para situar la problemática que se aborda en esta investigación, es necesario comprender la realidad en nuestra vida cotidiana, en donde se han desarrollado hábitos y formas de interacción con los estímulos externos que encontramos en el entorno construido y natural (Biermann, 2018). Esto ha llevado a que se desarrollen patrones globales de consumo y extracción de recursos,

estructuras de poder social y modelos de desarrollo económico (Capdevila, 2014). No obstante, nuestra relación con las ciudades va más allá de acciones prácticas y contribuyendo al desarrollo cognitivo de las poblaciones y las formas culturales de existir Y habitar el mundo (Jones, 2019), debido a esto surgen diversas maneras de vivir y de relacionarse con el entorno natural (Suchman, 1987). Una de estas situaciones es la necesidad de suplir de recursos naturales como el agua para la sobrevivencia humana pero que una vez utilizada es devuelta al planeta con una carga alta de contaminantes, debido a prácticas cotidianas instauradas en los modelos de habitar.

Esta situación plantea la oportunidad de integrar estrategias que permitan la regeneración de ecosistemas intervenidos por acciones humanas, otorgando un valor significativo al tejido natural y urbano en zonas marginales de poblaciones contemporáneas. Es en este contexto nace el simbolismo que las personas asocian a lugares intervenidos, reflejando acuerdos colectivos establecidos en tiempos pasados para la expansión, desarrollo de los tejidos urbanos y sus servicios de abastecimiento (Goodman, 1978).

Es importante destacar que la población se encuentra inmersa en un sistema global de posesión y extracción de recursos naturales (Capdevila, 2014). En este panorama se evidencia la desconexión del ser humano con el medio ambiente por medio de las intervenciones y prácticas actuales que carecen de simbolismo (UNESCO, 2015), estableciendo mecanismos y técnicas empleadas en las infraestructuras urbanas, que generan dificultades urbanas, de salubridad y la contaminación ambiental, afectando principalmente los

Marco

Teórico Conceptual

ecosistemas naturales acuáticos en donde se incrementa el vertimiento inadecuado de aguas residuales e industriales sin tratamiento (UN-hábitat, 2016).

En consecuencia, en el contexto actual el medio ambiente enfrenta una serie de problemas fenómenos y variables, en donde surge la necesidad de explorar estrategias innovadoras para el desarrollo en la participación comunitaria para optimizar el uso de recursos naturales como el agua (UN-hábitat, 2016). estos enfoques se alinean a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, que integren políticas públicas y que proporcionen un marco global para guiar los procesos hacia un desarrollo resiliente, equitativo y sustentable para futuras generaciones. Referente a los ecosistemas afectados por las actividades humanas como cuencas hídricas o de abastecimiento de agua (Naciones Unidas, 2015).

En este marco, el Diseño hacia la Biorremediación surge como estrategia con la cual se busca regenerar los ecosistemas. Estas alternativas fueron desarrolladas a principios de la década de 1980, centrándose en la remediación biológica con características fisicoquímicas mediante el uso de organismos vivos como bacterias y hongos, que tienen la capacidad de degradar materiales nocivos para los ecosistemas acuáticos (Garzón, 2017). Se busca analizar diversas prácticas de gestión y transformación de ecosistemas que no solo contribuyan a mejorar la calidad de vida humana, sino que también fomenten un desarrollo inclusivo y sustentable para las generaciones presentes y futuras, basándose en principios ecológicos (Smith, 2023).

En efecto, los procesos biológicos que están implícitos

en la biofabricación con sistemas vivos como el Micelio, se desarrollan bajo protocolos experimentales en donde se busca establecer las características físicas para el crecimiento y proliferación de las especies de hongos en tiempos y áreas de cultivos diseñados (Juwarkar, 2010), identificando las propiedades para la degradación de metales pesados en ecosistemas acuáticos. Para este desarrollo se alinearon teorías referentes al diseño sustentable, en donde se implica la gestión y transformación de los ecosistemas para aprovechar de forma equilibrada sus bienes y servicios, sino también minimizar los conflictos derivados de la explotación de estos recursos. Es fundamental reconocer la necesidad de distribuir equitativamente los costos y beneficios ecológicos entre los diversos actores involucrados (Steffen, 2011). La implementación efectiva de un modelo de desarrollo sustentable debe evitar la degradación o destrucción de la base ecológica de producción, fabricación y habitabilidad, fomentando un equilibrio dinámico entre el progreso tecnológico y ambiental del biomaterial (Smith, 2023).

Con la finalidad de aportar a procesos y estrategias referentes a incidir en el Diseño de hábitats regenerativos, en donde el objetivo es impulsar la relación del ser humano con la naturaleza y la manera en que esto permite la revitalización ambiental con un enfoque interdisciplinar (Jones, 2019). Esta perspectiva promueve una visión integral que considera las necesidades humanas, incentivando prácticas alternativas como la sustentabilidad ambiental en comunidades para la regeneración del ecosistema de su entorno, integrando posturas estrategias para la revolución de los hábitats regenerativos (Steffen, 2011). Actualmente, el objetivo principal es regenerar, reintegrar y reconfigurar la tierra

y los recursos, así como la forma en que la humanidad se alimenta y se moviliza (Meza, 2022). Se reconoce la necesidad de adoptar métodos y formas de interactuar con la naturaleza, incorporando la reestructuración de los ecosistemas habitados por el ser humano para suplir sus necesidades espaciales y de supervivencia. En esta búsqueda, la revitalización de las zonas verdes urbanas afectadas por problemáticas relacionadas con la relación entre la vida humana y la naturaleza es fundamental. Esto implica un rediseño de los espacios urbanos para integrar áreas naturales que contribuyen no solo a la mejora del bienestar de las personas, sino también a la recuperación de la biodiversidad. Además, se promueve una colaboración entre diversas disciplinas como la arquitectura, la ingeniería, las ciencias ambientales y biológicas, con el fin de crear soluciones que sean tanto innovadoras como adaptables a las realidades locales. La regeneración de hábitats busca transformar las ciudades en lugares más resilientes.

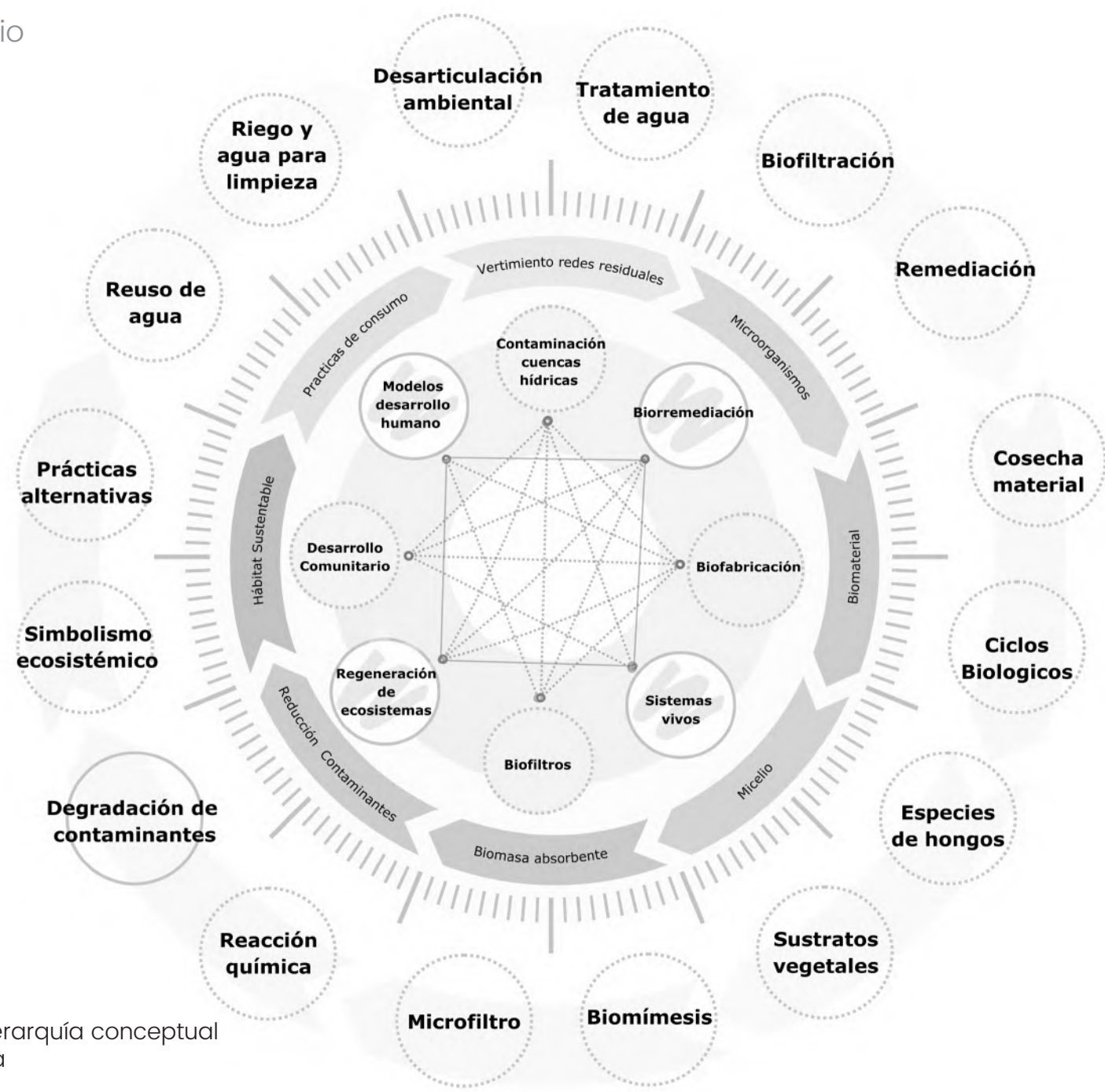


Figura 15. Esquema de jerarquía conceptual y acciones de referencia

Estado

Del Arte-Referencias

Este apartado contine las bases y referentes del objeto de estudio, este se divide en cuatro enfoques el primero son las estrategias para disminuir contaminación ambiental y ciclo de vida del agua, el segundo son las estrategias de Biorremediación con hongos y biofabricación de micelio, especies y materia en abundancia en Michoacán, en el tercero momento se realiza el análisis de las condiciones ambientales de cuencas hidrográficas, se integran las referencias de técnicas de validación del filtrado del agua con énfasis en desarrollo sustentable, multidisciplinar y experimental. Para finalmente diseñar procesos regenerativos que se integren como solución alternativa a prácticas tradicionales del tratamiento de agua con sistemas vivos. En la figura 15, se amplía el esquema que estructura las referencias y las bases teóricas que han tenido relación con el estudio de tratamiento de agua con sistemas vivos como el Micelio.

Los asentamientos contemporáneos presentan una desarticulación significativa en el manejo del ciclo de vida de los residuos generados en nuestra vida cotidiana, lo que ha contribuido al deterioro ambiental (Schwarzenbach,

2010). Esta problemática afecta directamente a las cuencas hídricas que terminan infestadas por materia de descarte de prácticas antropocentristas de las poblaciones, esto derivado por el modelo de construcción estandarizada que no regula el estado del flujo del agua luego de ser utilizada por actividades humanas y que aporta al deterioro del medio ambiente, con descargas y vertimientos de las redes residuales impactando negativamente en los ecosistemas a diferentes escalas, desde el ámbito doméstico hasta el municipal (Instituto de Recursos Mundiales, 2021).

Las consecuencias de esta situación han motivado la investigación en realizar los esfuerzos por obtener la biorremediación del agua contaminada. Por parte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), han utilizado microfiltros para tratar aguas afectadas por contaminantes como bacterias coliformes fecales, solidos en suspensión y turbidez, en arroyos y ríos locales. Por su parte Las especies de hongos, como *Trametes versicolor* y *Ganoderma*, han mostrado potencial en estos estudios de Biorremediar condiciones de suelos y aguas (Valencia, 2017). La integración de diversas especies biológicas y el uso de nutrientes orgánicos en cultivos de micelio, permiten el desarrollo experimental para el tratamiento de agua que contribuyan a la revitalización de los ecosistemas naturales.

Para abordar estos desafíos, es esencial implementar mecanismos y procesos como la biofabricación, que involucra la creación de sistemas vivos utilizando materiales de bajo impacto ecológico, reciclados o de origen vegetal que sean biocompatibles, que no generen toxicidad para

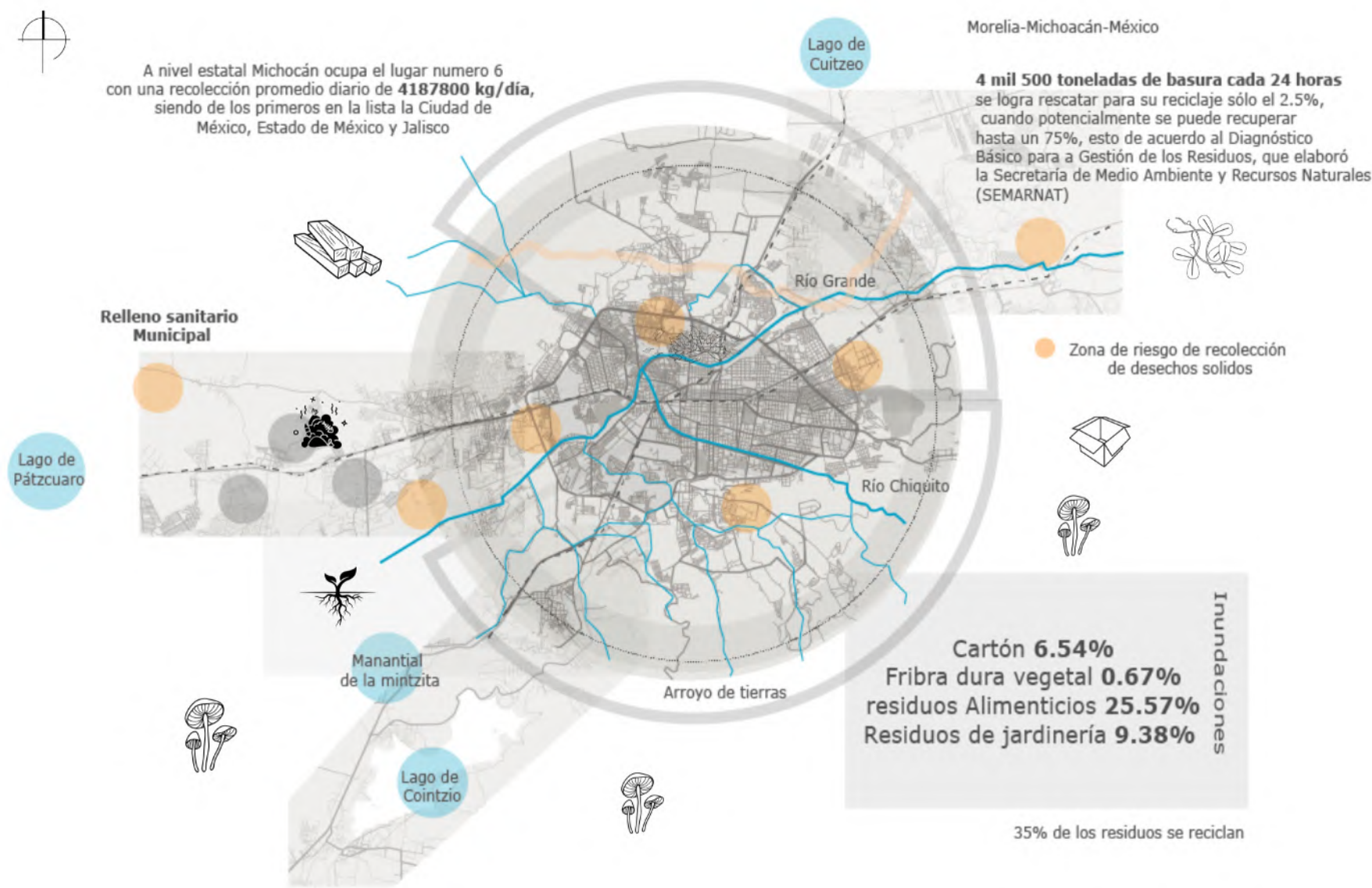


Figura 16. Abundancia material zona de estudio

las personas ni para el medio ambiente. Los estudios sobre aplicaciones de fibras naturales y el desarrollo de biomateriales muestran resultados prometedores, como la creación de membranas vivas adaptadas a las necesidades del hábitat (Metcalf, 2014). Un ejemplo es la utilización de biomateriales cultivados, como el micelio, desarrollado por Torasso (2023). Este biomaterial, compuesto por redes de filamentos de hongos, tiene un notable potencial para regenerar las condiciones de los cuerpos de agua naturales, contribuyendo significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Mekonnen, 2024). El micelio, al descomponer materia orgánica muerta y desintoxicar cuencas de arroyos, puede desintegrar contaminantes y compuestos tóxicos en el agua, como hidrocarburos, pesticidas y metales pesados (Vandelook, 2021).

En este contexto, el aprovechamiento de residuos transformados en productos o subproductos útiles es necesario para reducir la cantidad de materia en abundancia en descarte acumulada en las ciudades contemporáneas, conservar recursos naturales, disminuir el consumo de energía y reducir la contaminación ambiental. Las estrategias de construcción deben enfocarse en la protección del medio ambiente, que garantice la durabilidad del material, reducción en huella de carbono y el reciclaje de materias primas abundante como la celulosa orgánica (González, 2019). En la ciudad de Morelia y periferias se evidencia el alto porcentaje de materiales desaprovechados que son potencial para los sustratos y el crecimiento del micelio, en la figura 16 se ilustra disponibilidad de la materia en abundancia de la ciudad de morelia.

Estrategias de Biorremediación con **hongos de micelio**

La biorremediación es una disciplina científica relativamente reciente que se fundamenta en la capacidad natural de microorganismos y hongos para degradar contaminantes ambientales (Gadd, 2001). Aunque los procesos biológicos de degradación y transformación de sustancias han existido por millones de años, su aplicación sistemática para la remediación de ambientes contaminados comenzó a desarrollarse a mediados del siglo XX (López, 2020). Los primeros indicios de interés en esta área surgieron en la década de 1940, con estudios que demostraron la capacidad de ciertos microorganismos para metabolizar compuestos sintéticos, como hidrocarburos y pesticidas (Mekonnen, 2024).

A lo largo de las décadas siguientes, particularmente en los años 1970 y 1980, la biorremediación fue reconocida como una estrategia viable para la gestión de residuos y la recuperación de ecosistemas contaminados, gracias a avances en biotecnología y microbiología (López, 2020). Desde la década de 1990, la biorremediación se ha consolidado como una técnica aplicada en la industria y la gestión ambiental, con un enfoque creciente en el uso de hongos y micelio para la degradación de compuestos tóxicos en suelos y aguas (Pointing, 2001).

En los años 2000, México adoptó estrategias regenerativas

para el tratamiento de aguas, investigaciones realizadas en universidades y centros de investigación, junto con proyectos de colaboración con empresas privadas, consolidaron la biorremediación como una práctica común para el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas (Vargas, 2021). Proyectos exitosos en diversas regiones, incluyendo Morelia, han demostrado resultados positivos. Un ejemplo es el tratamiento del agua en el lago de Cuitzeo, donde se han utilizado algas y microorganismos para reducir los niveles de contaminantes (Yépez, 2022). Asimismo, en el río Chiquito se han implementado técnicas combinadas de fitorremediación y biofiltración, mostrando resultados prometedores (Martínez, 2020).

Según datos de la CONAGUA, para el año 2017 las plantas de tratamiento que emplean biorremediación han logrado reducir los niveles de contaminantes en un 60-80% en algunos casos (Pérez, 2022). Además, estudios de campo han documentado mejoras en la biodiversidad y la calidad del agua en cuerpos de agua tratados con estas técnicas (Ramírez, 2019). La biorremediación ha demostrado ser una estrategia clave para combatir la contaminación del agua en Michoacán, México contribuyendo significativamente a la sustentabilidad y salud ambiental de la región (Silva, 2018).

Las estrategias de biorremediación con hongos y micelio se basan en la utilización de organismos fúngicos para la descomposición, transformación y eliminación de contaminantes en suelos y aguas. Los hongos presentan un sistema enzimático altamente versátil que les permite degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos,

incluyendo aquellos que son difíciles de tratar mediante métodos convencionales como hidrocarburos, pesticidas y metales pesados (Gadd, 2001). Para esta técnica específica que utiliza hongos para degradar contaminantes complejos, tales como hidrocarburos, pesticidas y metales pesados. Este proceso se lleva a cabo a través de la oxidación enzimática, donde enzimas presentes en los hongos como la peroxidasa, lacasa y manganoso peroxidasa desempeñan roles críticos en la descomposición de contaminantes (Mekonnen, 2024). Otra característica relevante es la biorremediación fúngica, en la cual los hongos establecen simbiosis con plantas para mejorar la capacidad de las plantas de extraer o degradar contaminantes. Los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) son un ejemplo de esta simbiosis, facilitando la absorción de metales pesados por las plantas y optimizando así el proceso de limpieza del suelo (Mekonnen, 2024). Además, los biofiltros de micelio utilizan la red de filamentos (hifas) del micelio para tratar aguas residuales, actuando como una esponja natural que absorbe y descompone contaminantes presentes en el agua (Pointing, 2001). Estas estrategias evidencian la versatilidad y efectividad de los hongos en la biorremediación, abordando diferentes tipos de contaminantes en variados entornos.

Diversas especies de hongos han demostrado un alto potencial para la biorremediación debido a sus capacidades específicas de degradación de contaminantes. *Pleurotus ostreatus* (seta de ostra) es conocido por su habilidad para descomponer hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), colorantes industriales y ciertos pesticidas. Su capacidad para crecer en una amplia variedad de sustratos lo hace adecuado para diversas aplicaciones (Mekonnen, 2024).

Trametes versicolor (cola de pavo) se distingue por su producción de lacasa, una enzima eficiente en la degradación de compuestos fenólicos, colorantes textiles y algunos compuestos farmacéuticos (Pointing, 2001). *Aspergillus niger*, conocido principalmente por su uso industrial en la producción de ácido cítrico, también tiene la capacidad de degradar metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, lo que lo hace útil en la biorremediación (Gadd, 2001). *Ganoderma lucidum* (Reishi) puede descomponer una variedad de compuestos orgánicos, incluyendo PAHs, y es resistente a condiciones ambientales adversas, lo que facilita su uso en diferentes entornos contaminados (Juwarkar, 2010). Finalmente, *Phanerochaete chrysosporium* es uno de los hongos más estudiados en biorremediación debido a su capacidad para degradar lignina y contaminantes industriales como PAHs y dioxinas (Mekonnen, 2024). La selección de estas especies para proyectos de biorremediación dependerá del tipo de contaminante, las condiciones ambientales y la disponibilidad de sustratos adecuados para el crecimiento fúngico.

En México, diversas especies de hongos han demostrado un notable potencial para la biorremediación, adaptándose eficazmente a las condiciones ambientales del país y abordando una variedad de contaminantes tanto en suelos como en aguas. *Pleurotus ostreatus*, conocido localmente como seta de ostra, ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para degradar contaminantes



Figura 17. Biofiltro *Ganoderma*, filtrado del agua, Ecuador

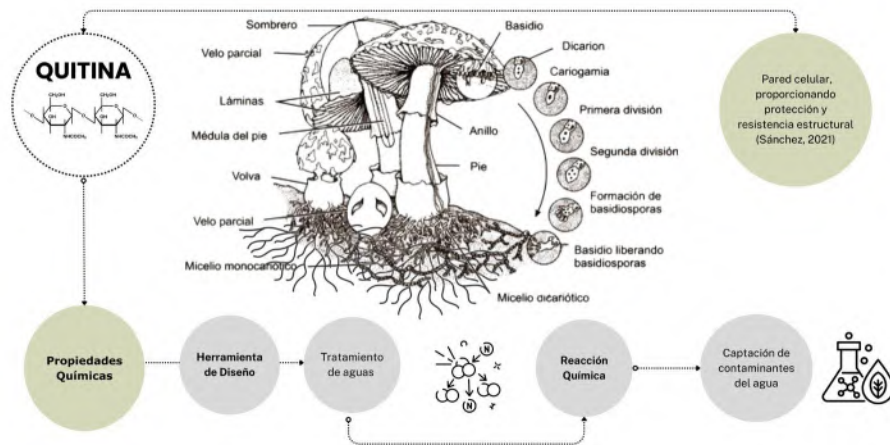


Figura 18. Partes principales de un seta adulta. (Rinaudo, 2006)



Figura 19. Un módulo flotante de micelio es capaz de limpiar los ríos contaminados de Estados Unidos, Recuperado: <https://www.archdaily.mx/mx/1011257/>

orgánicos, como hidrocarburos y pesticidas, en suelos contaminados (Tirado, 2016) Además, este hongo es eficaz en la degradación de hidrocarburos y colorantes industriales en aguas residuales debido a la producción de enzimas oxidativas como la lignina peroxidasa y la casa (Tirado, 2016). *Trametes versicolor*, o cola de pavo, es igualmente relevante en ambos contextos; en suelos, muestra eficacia en la degradación de compuestos fenólicos y colorantes industriales (García, 2022), mientras que, en aguas residuales, su capacidad para secretar la casa facilita la degradación de compuestos fenólicos y colorantes textiles (García, 2022).

Lentinula edodes, conocido como shiitake, ha sido utilizado para tratar suelos contaminados con metales pesados gracias a sus propiedades biosorbentes (Gomez, 2020), también ha demostrado potencial para la remediación de aguas contaminadas con metales pesados y compuestos orgánicos (Gomez, 2020). En la figura 17 se presenta el prototipo desarrollado con la especie *Ganoderma lucidum*, con aplicaciones medicinales, destaca por su resistencia a condiciones adversas y su capacidad para degradar compuestos orgánicos en suelos contaminados (valencia, 2017). En el tratamiento de aguas residuales, este hongo es eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos complejos (Spezzia 2012). *Fomes fomentarius* ha mostrado una alta capacidad de biosorción en la remediación de aguas contaminadas con metales pesados y compuestos tóxicos (Lechner, 2018). Finalmente, *Pleurotus pulmonarius* es efectivo en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados en diversas regiones de México (Carmona, 2023). La aplicación de estas especies

en proyectos de biorremediación en México se fundamenta en su adaptabilidad a las condiciones locales y su capacidad para abordar una amplia gama de contaminantes tanto en suelos como en aguas.

La elección de hongos para este estudio estuvo orientada por su capacidad para proliferar y crecer en condiciones controladas, así como por su eficacia en la degradación de contaminantes. Estudios previos han demostrado que este hongo puede degradar diversos compuestos tóxicos en suelos contaminados (Chen, 2020). De manera similar, *Pleurotus* spp. ha sido documentado por su capacidad para descomponer compuestos orgánicos en aguas residuales, destacando por su alta tasa de crecimiento y su habilidad para degradar celulosa y lignina, lo que contribuye a la reducción de contaminantes en el agua (Roy, 2021).

La composición morfológica de la pared celular de los hongos está constituida por redes entramadas de fibras, conformadas por nanofilamentos de quitina (NFQ) (Navarro, 2023). Las quitinasas actúan en respuesta de defensa al ataque de estos inhibiendo la germinación de las esporas (Rodríguez, 2009). La quitina es el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa (Villagrán, 2019), en la figura 18 se muestra su estructura cristalina está conformada por cadenas poliméricas que se encuentran aledañas e interaccionan por enlaces de hidrógeno (Armendáriz, 2024). Estos enlaces de hidrógeno actúan intermolecularmente en las cadenas originando alomorfismo en la quitina (Navarro, 2023). Por ello, este polímero se suele utilizar en la depuración de aguas residuales, en Puerto Cuatrerros Argentina el 2019 se realizó muestreo

de con membranas de seston de fitoplancton filtrando al vacío, obtenido resultados prometedores para remediar las condiciones del agua (Villagrán, 2019).

Se busca integrar el uso de sistemas vivos oxidantes para descomponer contaminantes, estos métodos mejoran la calidad del agua tratada (Armendáriz, 2024), generando una reacción fisicoquímica del biomaterial, y esta guía es clave para el desarrollo experimental de las características del biofiltro de micelio. Además, el empleo de estos procesos permite una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, contribuyendo a la restauración de ecosistemas afectados por la contaminación. La figura 19 muestra el módulo flotante de micelio capaz de limpiar los ríos contaminados en Estados Unidos, tecnologías como la oxidación avanzada con el uso de especies vegetales, puso en funcionamiento grupos de investigación de la Escuela de diseño de Rhode Island (RISD), en la facultad de artes plásticas y diseño, el año 2023 donde se optimizaron procesos de producción e implementación de estrategias como un sistema contenedor de especies con propiedades de biorremediación que se integran de forma coherente con los prototipos de micelio dispuestos en las riberas de ríos (Armendáriz, 2024). Esto no solo resulta en una reducción significativa de la contaminación, sino que también promueve la sostenibilidad a largo plazo en el manejo de recursos hídricos (Beltrán, 2016). Desde esta perspectiva, la figura 20, nos ilustra los proyectos asociados con el desarrollo, estudio con el micelio y el tratamiento de agua de forma global.

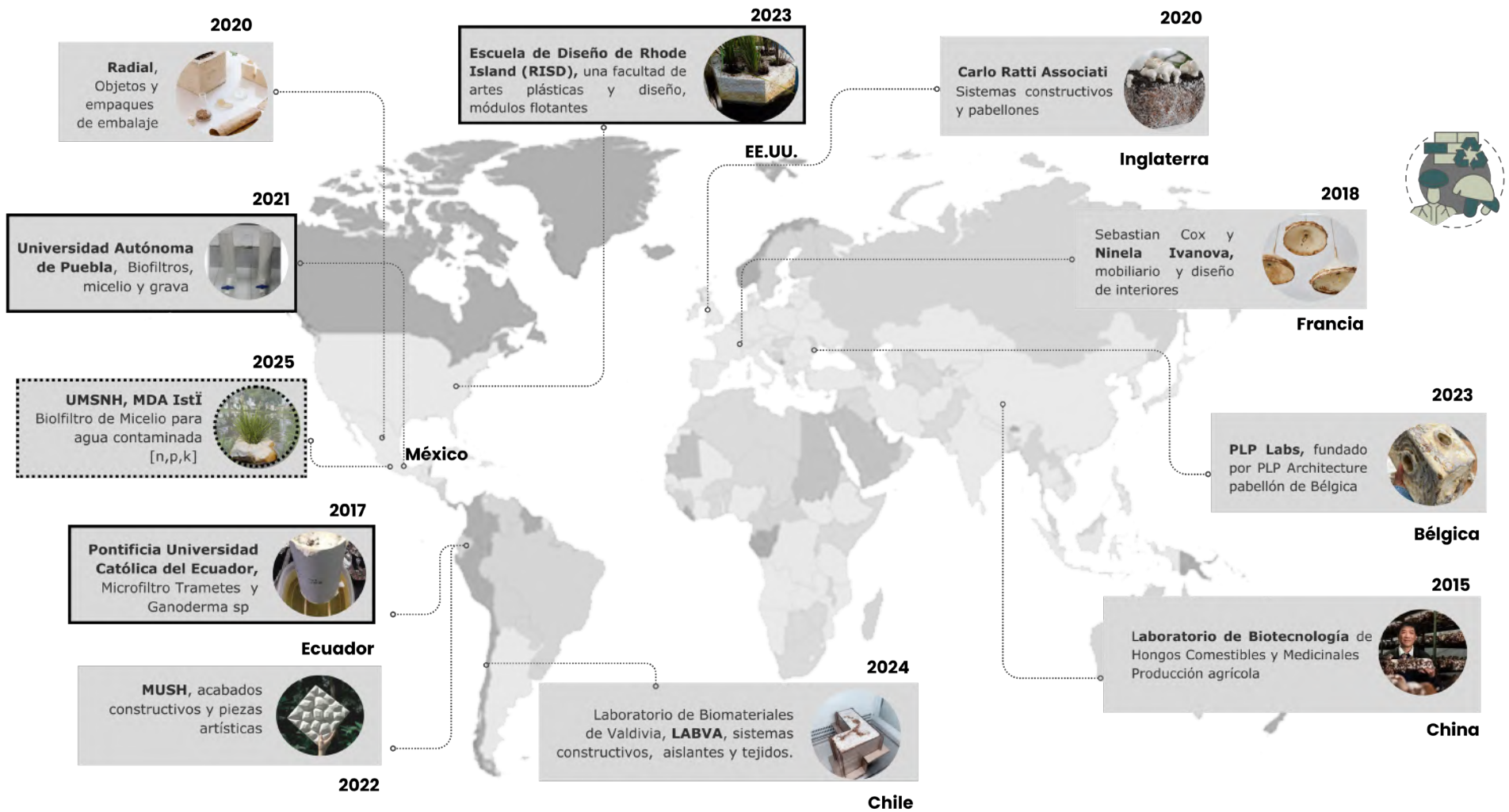


Figura 20: Referentes analógicos desarrollo con biomasa de Micelio, país y año de producción

ITSi

Análisis condiciones del agua contaminada

Las condiciones básicas del agua son fundamentales para su reintegración al ecosistema mediante el tratamiento de aguas residuales, proceso esencial para preservar la calidad del agua y proteger el medio ambiente (Ramírez, 2019). Este tratamiento debe ser eficaz, y para ello es necesario estudiar diversas condiciones físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales. Este análisis incluye la caracterización del porcentaje de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y otros contaminantes, así como parámetros microbiológicos y físicos (Lambert, 2014). A continuación, se describen los principales tipos de condiciones que deben analizarse, con un enfoque en la situación específica de la cuenca del lago de Pátzcuaro.

El análisis de las condiciones físicas del agua residual incluye parámetros como la temperatura, el color, la turbidez y los sólidos suspendidos. Estos factores pueden afectar significativamente los procesos de tratamiento y saneamiento (Lambert, 2014). Según Metcalf (2014), la medición de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos

disueltos totales (SDT) es esencial para determinar la carga de materia particulada en el agua residual (Apha, 2017).

El análisis biológico implica la identificación y cuantificación de microorganismos patógenos y no patógenos en el agua residual (Metcalf, 2014). La presencia de coliformes fecales, *Escherichia Coli* y otros indicadores microbiológicos son útiles en la evaluación de la contaminación biológica y en la identificación de riesgos para la salud pública (Bitton, 2010). Además, el estudio de la actividad microbiológica proporciona información sobre los procesos de biodegradación y la efectividad de los tratamientos biológicos (Galderisi, 2014). La articulación en el estudio de las condiciones físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es fundamental para desarrollar tratamientos eficaces y sustentables (Ramírez, 2019).

En cuanto al análisis químico, es importante identificar la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos, incluidos nutrientes como nitrógeno y fósforo, metales pesados como productos químicos industriales y contaminantes emergentes. Según Tchobanoglous (2003), la demanda química de oxígeno (DQO) en donde se busca identificar toda la materia oxidable, incluyendo la que no puede ser degradada por microorganismo y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en donde se mide la materia orgánica biodegradable (Tchobanoglous, 2003). Estos son indicadores clave de la cantidad de materia orgánica presente en el agua, lo que ayuda a evaluar el grado de contaminación y la eficiencia de los procesos de tratamiento (Brown, 2022).

Técnicas empleadas para la validación del tratamiento del agua.

La integración de EIS con espectrofotometría UV Vis en ensayos con micelio puede brindar un enfoque completo: la EIS indica actividad biológica y cambios en la resistencia del sistema durante el tratamiento, mientras que UV Vis ofrece medidas cuantitativas directas de remoción de N, P y K. Esta combinación metodológica permite validar eficiencia de sistemas de biofiltración micelial en el tratamiento de materiales contaminantes problemáticos, con aplicaciones potenciales en agroecosistemas, tratamiento de aguas agrícolas o efluentes urbanos. La espectroscopía de impedancia electroquímica es una técnica ampliamente utilizada para el estudio de materiales con propiedades eléctricas diversas, como conductores iónicos, semiconductores y dieléctricos (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005; Cottis, 1999), así como en la investigación de sistemas líquidos como el agua y soluciones iónicas, permitiendo analizar su comportamiento eléctrico, la dinámica de los iones presentes y los procesos de transporte de carga (Tribollet, 2008). Desde un punto de vista matemático, la impedancia (Z) se describe como un número complejo que se obtiene al dividir el fasor del voltaje (E) entre el fasor de la corriente (I); esta relación representa la respuesta del sistema ante una excitación sinusoidal aplicada (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005; Cottis, 1999). La técnica consiste en aplicar señales de corriente o potencial de amplitud

controlada en un rango de frecuencias establecido, y registrar las respuestas del sistema en términos de amplitud y desfase, o bien en sus componentes real e imaginaria (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005; Cottis, 1999). Para ello, se suelen emplear celdas de medición con dos electrodos idénticos situados en las caras externas del material, configurados en forma cilíndrica o prismática (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005; Cottis, 1999). La EIS permite evaluar cómo diversas propiedades intrínsecas del material o factores externos alteran la conductividad del sistema (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005; Cottis, 1999). Los parámetros extraídos a través de esta técnica se agrupan en dos áreas principales: por un lado, las características del material, como la conductividad eléctrica, la constante dieléctrica, la movilidad de portadores de carga y las concentraciones de equilibrio de especies cargadas; por otro lado, los procesos interfaciales en el electrodo de trabajo, incluyendo constantes cinéticas de adsorción y reacción, la capacitancia en la interfaz y los coeficientes de difusión de las especies reactivas implicadas.

Elementos eléctricos pasivos para el modelado de sistemas electroquímicos, son los dispositivos eléctricos pasivos son aquellos que no producen energía eléctrica ni generan un voltaje por sí mismos. Un circuito conformado únicamente por estos componentes se denomina circuito pasivo. Para modelar circuitos complejos, es común utilizar circuitos equivalentes simplificados que emplean exclusivamente componentes pasivos, tales como resistencias y condensadores (Tribollet, 2008; Cottis, 1999). En electroquímica, se incorporan elementos especializados para representar con mayor precisión los comportamientos

eléctricos observados, incluyendo los elementos de fase constante, que reflejan características capacitivas no ideales del sistema de estudio (Tribollet, 2008; Barsoukov, 2005). En la Figura 10 se muestran las ilustraciones esquemáticas asociadas a estos dispositivos

La técnica de medición con tres electrodos (3E) es común en estudios electroquímicos, enfocándose principalmente en el espacio entre el electrodo de trabajo (WE) y el material bajo análisis. En esta configuración, el contraelectrodo (CE) suministra la corriente necesaria para el sistema, mientras que el WE registra la corriente que fluye a través de la celda. El electrodo de referencia (ER) actúa como un punto de comparación estable, permitiendo aislar y analizar exclusivamente los procesos que ocurren en la interfaz WE-solución (Tribollet, 2008). En la Figura 18 se muestran el esquema de la celda electroquímica y su configuración.

Por su parte la integración del estudio de la reducción de nutrientes se realiza con el agua con presencia de especies inorgánicas como ortofosfato (PO_4^{3-}), fósforo total, nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) es esencial para validar la eficiencia de sistemas de biofiltración micelial (Mekonnen, 2024). Estos compuestos se determinan comúnmente mediante espectrofotometría UV Visible, utilizando métodos colorimétricos ampliamente aceptados en el análisis de aguas residuales y naturales (APHA, 2017).

La cuantificación de fósforo total y ortofosfato (PO_4^{3-}). El método tradicional mexicano para la determinación de fósforo en aguas naturales y residuales utiliza el método colorimétrico de Murphy-Riley con reducción

del molibdato de amonio y ácido ascórbico, formando el característico complejo azul de molibdeno que se mide espectrofotométricamente (APHA, 2017). En México, Limón Pérez (2018) validó este procedimiento según las pautas del CENAM EMA y criterios de espectrofotometría UV Visible, asegurando precisión, exactitud y rango de aplicación en muestras naturales y tratadas. Para el ortofosfato, se emplea el método del ácido ascórbico, en el cual se forma un complejo azul-molibdato detectable a 690 nm. En el caso del fósforo total, el procedimiento incluye una digestión ácida previa que convierte todas las formas de fósforo a ortofosfato, seguido del mismo método colorimétrico (USEPA, 1993).

El nitrato (NO_3^-) se cuantifica típicamente mediante reducción a nitrito con cadmio y posterior formación de un compuesto azoico rojo con ácido sulfanílico, cuya absorbancia se mide a 543 nm (USEPA, 1983). El nitrito (NO_2^-), por su parte, se determina directamente por el método del reactivo de Griess, sin reducción previa, con una lectura también en el rango de 540–550 nm (Greenberg et al., 2017).

El ion nitrato (NO_3^-) no es directamente reactivo en medios colorimétricos, por lo que debe ser reducido previamente a nitrito (NO_2^-) utilizando una columna de cadmio activado con cobre. El nitrito reacciona con sulfanilamida en medio ácido, formando una sal de diazonio, que luego se acopla con N-(1-naftil) etilendiamina (NED), generando un complejo azoico de color púrpura, cuya absorbancia se mide a 543 nm. Esta reacción, altamente sensible, permite cuantificar nitrito directamente y nitrato de manera indirecta tras la reducción (NMX-AA-079-SCFI-2001). La curva de

calibración se construye con soluciones estándar de nitrito o nitrato, según corresponda, permitiendo establecer una relación lineal entre absorbancia y concentración en el rango de trabajo.

Para la determinación del ion amonio (NH_4O) mediante su reacción con el reactivo de Nessler, una solución alcalina de tetraiodomercurato de potasio ($\text{K}_2[\text{HgI}_4]$). En presencia de amonio, se forma un complejo coloreado que varía del amarillo al marrón, dependiendo de la concentración, como resultado de la formación de un derivado de amido-mercurio (HgNH_2I). Esta reacción se desarrolla a pH alcalino y produce un complejo con absorbancia máxima entre 400 y 425 nm. La intensidad del color es proporcional a la concentración de amonio, permitiendo su cuantificación mediante interpolación en una curva de calibración (APHA, 2017; NMX-AA-026-SCFI-2010).

ITSi

Formas biológicas para la restauración del ecosistema acuático

Las diversas prácticas y técnicas biológicas para la restauración de los procesos y ciclos de vida del agua presentan enfoques innovadores y sustentables que imitan y potencian los mecanismos naturales de purificación. Estrategias como los biofiltros, la fitorremediación, los reactores biológicos de membrana, las lagunas de estabilización, los humedales artificiales y los bosques de manglar desempeñan un papel clave en la biorremediación, permitiendo la eliminación eficiente de contaminantes a través de la acción de microorganismos, plantas y procesos físicos y químicos.

Los Biofiltros, emplean microorganismos adheridos a un medio filtrante, como la arena, grava o algún material sintético. Se utilizan para descomponer contaminantes a medida que el agua pasa a través del filtro (Armendáriz, 2024). Este proceso se lleva en periodos del tiempo y en diferentes capas.

La **fitorremediación**, este proceso implementa **plantas acuáticas** para absorber, acumular y degradar contaminantes de agua. Algunas plantas pueden extraer metales pesados y otros contaminantes del agua a través de sus raíces (Armendáriz, 2024).

Los **Reactores biológicos de membrana**. Combinan el tratamiento biológico con la filtración por membrana. Los microorganismos degradan los contaminantes y las membranas filtran los sólidos y los microorganismos del agua tratada. Dependiendo del tamaño de los poros de la membrana, estos procesos pueden filtrar partículas, iones y moléculas de diferentes tamaños (Armendáriz, 2024).

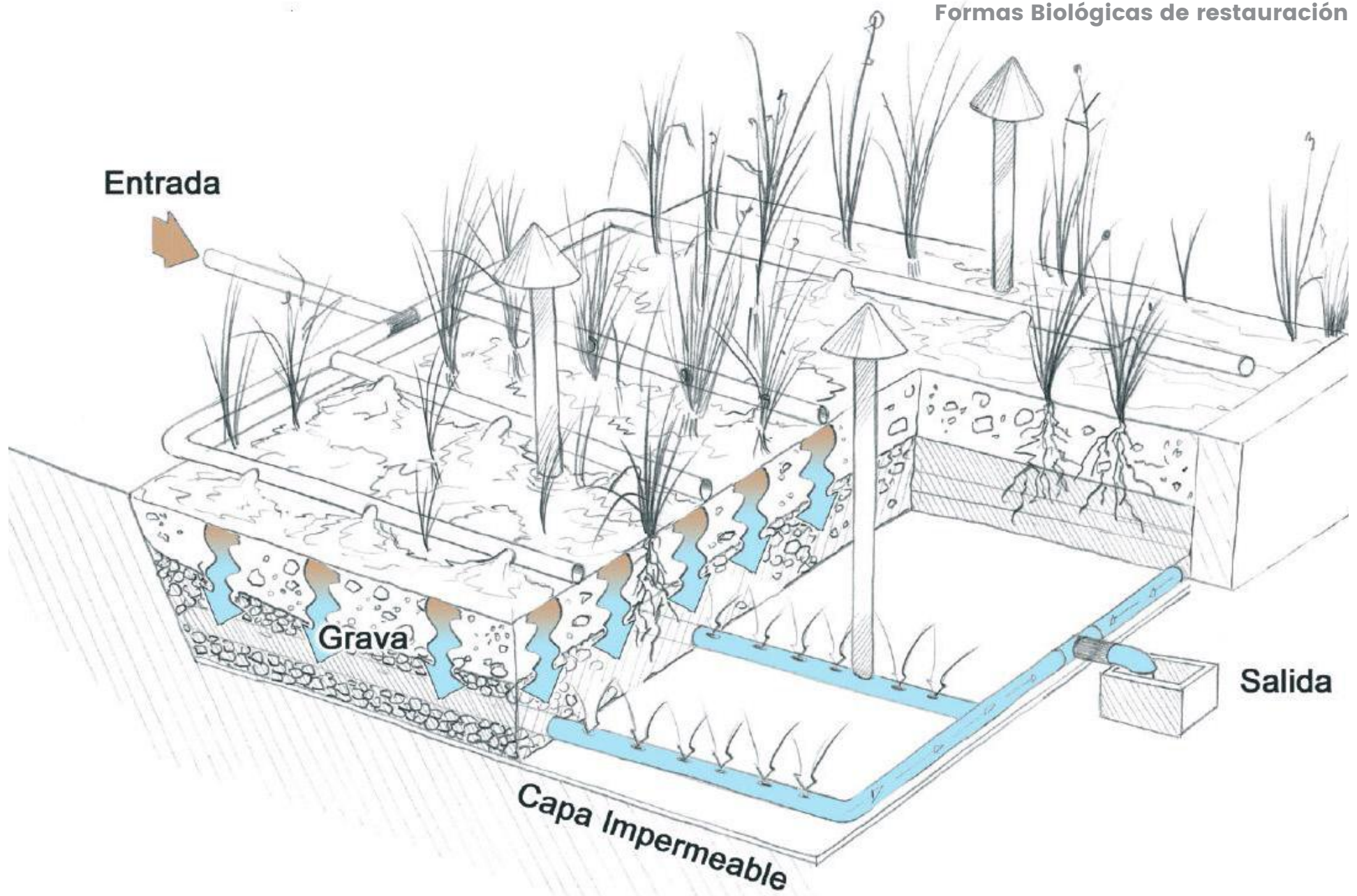


Figura 21 .Esquema de Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV) Autor. Instituto Tecnológico de Canarias, ITC recuperado: <https://depuranatura.blogspot.com/>

ITSi

Formas biológicas para la restauración del ecosistema acuático

Lagunas de estabilización. Son estanques artificiales donde se promueve el crecimiento de microorganismos y algas que descomponen los contaminantes del agua a través de procesos naturales como la fotosíntesis y la descomposición aerobia y anaerobia (Armendáriz, 2024).

Los **Bosques de manglar** son ecosistemas muy complejos con múltiples funciones ecológicas y alto valor económico. Son también ecosistemas que están sujetos a diversos impactos negativos, lo que está ocasionando su desaparición a una tasa anual que oscila entre el 1 y el 5 % (Flores, 2006) está determinado por diversos factores ambientales como el clima, el período de inundación o períodos con frecuencia y duración de la inundación de cierta área.

Los **ecosistemas de Humedales.** Ver figura 21 donde los fenómenos físico, químico y biológico, con la intervención del sol como fuente directa,

Los factores clave son la localización, características climáticas, tipo de especies vegetales autóctona con capacidad para depurar contaminantes orgánicos. Existen diversos tipos que varían según el flujo del agua y tipo de especies para sembrar (Arias, 2003). En el estado de Michoacán se encuentran dos cuerpos de agua de importancia nacional por sus características físicas y de abastecimiento de comunidades. El Lago de Cuitzeo representa el segundo cuerpo de agua natural con respecto a su extensión local y el Lago de Pátzcuaro representa un sitio importante por el asentamiento de la cultura e histórico de la comunidad purépecha (López, 2019). En

ambos ambientes se ha desarrollado un ecosistema de humedal, que son los receptores de las aguas de desecho de las comunidades aledañas, alterando sus características fisicoquímicas.

Según Vera Camacho et al (2013), los humedales costeros en el noroeste de México generan bienes y servicios ecosistémicos directos como pesca artesanal, recolección de materiales y actividades recreativas y servicios de protección como amortiguación de inundaciones, filtración de nutrientes y protección costera que benefician directamente a comunidades locales tanto en términos socioeconómicos como ecológicos. Estos usos reflejan interacciones directas entre sociedad y ecosistema (Arias, 2003). De manera complementaria, los humedales prestan servicios ecosistémicos indirectos esenciales como regulación hídrica como, por ejemplo, la atenuación de inundaciones al retener agua en llanuras de aluvión, protección costera en manglares al amortiguar ondas de tormenta, y mejoras en la calidad del agua mediante reciclaje de nitrógeno y sedimentos, aportando beneficios a poblaciones ribereñas y comunidades (Vera, 2007).

Existen instrumentos normativos internacionales y nacionales para la protección del humedal. México es parte de la Convención Ramsar, firmada en Ramsar (Irán) el 18 de enero de 1971 y en vigor desde el 21 de diciembre de 1975, cuyo objetivo central es la conservación y uso racional de los humedales a escala global. Desde su adhesión el 4 de noviembre de 1986, México se ha consolidado como el segundo país con más Sitios Ramsar, con 142 humedales designados que cubren casi nueve millones de hectáreas a

junio de 2023 (CONAGUA, 2023). A nivel nacional, la Ley de Aguas Nacionales, artículo 86 Bis 1, establece facultades a la CONAGUA para delimitar, clasificar y mantener el Inventario Nacional de Humedales, así como proponer normas oficiales, promover su restauración y establecer perímetros de protección para preservar sus condiciones hidrológicas y ecológicas.

Cada una de estas formas biológicas de tratamiento de agua contribuyen a la regeneración de los ecosistemas acuáticos y su biodiversidad. En la figura 18 se muestra el desarrollo técnico de un humedal en las periferias de cuerpos de agua en donde existe una adaptada a las condiciones específicas de cada cuerpo de agua, resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y mitigar los efectos de la contaminación (Vera, 2007). Así, la integración del conocimiento ecológico con soluciones tecnológicas basadas en la naturaleza permite avanzar hacia modelos de gestión del agua más eficientes y en armonía (Camacho, 2013). Además, Estos modelos fortalecen la capacidad de los ecosistemas acuáticos para autorestaurarse y fomentan la participación comunitaria, permitiendo el desarrollo de acciones alternativas para el tratamiento de agua. Estas acciones favorecen la conservación y el manejo sustentable del agua a largo plazo (López, 2019).

Posturas de teoría de diseño en desarrollo de nuevas prácticas y procesos biomateriales

Este apartado examina diferentes enfoques contemporáneos del diseño, en donde sus contribuciones a la sustentabilidad, busca integrar prácticas de diseño avanzado en soluciones regenerativas y alternativas tangibles que aborden problemas reales en las ciudades contemporáneas (Creswell, 2014). Este Proyecto de investigación es híbrido, lo que permite integrar la dimensión material para la ejecución de prototipados mediante el diseño experimental y la innovación que permite la iteración de la propuesta proyectual, con especificaciones técnicas para la biofabricación con sistemas vivos como el micelio, alineándose a los principios del diseño regenerativo para el hábitat sustentable aportando estrategias descentralizadas para las poblaciones aledañas a cuerpos de agua, fomentando el diseño para la equidad, inclusión y cohesión social de comunidades que dependen de ecosistemas acuáticos. La sustentabilidad en el diseño se ha convertido en una prioridad crítica debido a los desafíos ambientales y sociales sin precedentes que enfrentamos (Cruz, 2015).

En el contexto de la sustentabilidad, se fundamenta en metodologías que integran la participación de usuarios o el objeto de estudio, la adaptación al entorno y la exploración de futuros posibles. Involucrar a los usuarios en el proceso creativo, fortalece la pertinencia de las soluciones y fomenta la apropiación de los productos y servicios diseñados (Sanders, 2012). Se reconoce la necesidad de adaptar las estrategias de diseño a las condiciones ambientales, sociales y culturales específicas de cada contexto, con el fin de optimizar el uso de los recursos locales y fortalecer la resiliencia comunitaria (Organización de las Naciones Unidas, 2017). Finalmente, se plantea la necesidad de

cuestionar los paradigmas vigentes y de explorar futuros alternativos mediante la construcción de escenarios orientados hacia el diseño regenerativo de ecosistemas (Dunne, 2013; Bleecker, 2009).

El Diseño situado destaca la importancia del contexto en el cual se desarrolla el diseño. Este enfoque reconoce que las prácticas de diseño no pueden ser universales, sino que deben adaptarse a las particularidades de cada situación Organización de las Naciones Unidas, 2017). Otra interpretación la realiza Suchman (1987) en donde argumenta que el conocimiento local y la comprensión del entorno específico son esenciales para crear diseños efectivos y sostenibles. En términos de sostenibilidad, el diseño situado promueve el uso de recursos locales y la integración de prácticas culturales y ambientales en el proceso de diseño, lo que puede reducir el impacto ambiental y aumentar la resiliencia comunitaria (Dunne, 2013).

Por esta razón se integra el diseño especulativo como metodología que utiliza escenarios hipotéticos para explorar y debatir futuros posibles (Bleecker, 2009). Este enfoque se aleja de la creación de productos tangibles inmediatos y se centra en generar reflexión crítica sobre las implicaciones de las tecnologías emergentes y las decisiones de diseño. Dunne et al., (2013) sostienen que el diseño especulativo puede desafiar las suposiciones existentes y abrir nuevas vías para la innovación sostenible. Al imaginar futuros alternativos, los diseñadores pueden identificar potenciales problemas y oportunidades, fomentando un pensamiento proactivo y sustentable (Brandsen, 2016).

En la figura 19, se muestra la integración de los enfoques puede enriquecer significativamente el campo del diseño sustentable. El Diseño asegura que las soluciones sean relevantes y aceptadas por las comunidades locales; el diseño situado garantiza que las prácticas de diseño sean contextualmente apropiadas y sensibles a los recursos locales; y el diseño especulativo permite una reflexión crítica sobre futuros posibles, orientando al diseño como estrategia hacia la sustentabilidad (Design Council, 2019). Al combinar estas metodologías, los diseñadores pueden desarrollar soluciones holísticas y resilientes que respondan a los complejos desafíos ambientales y sociales de nuestro tiempo (Light, 2018).

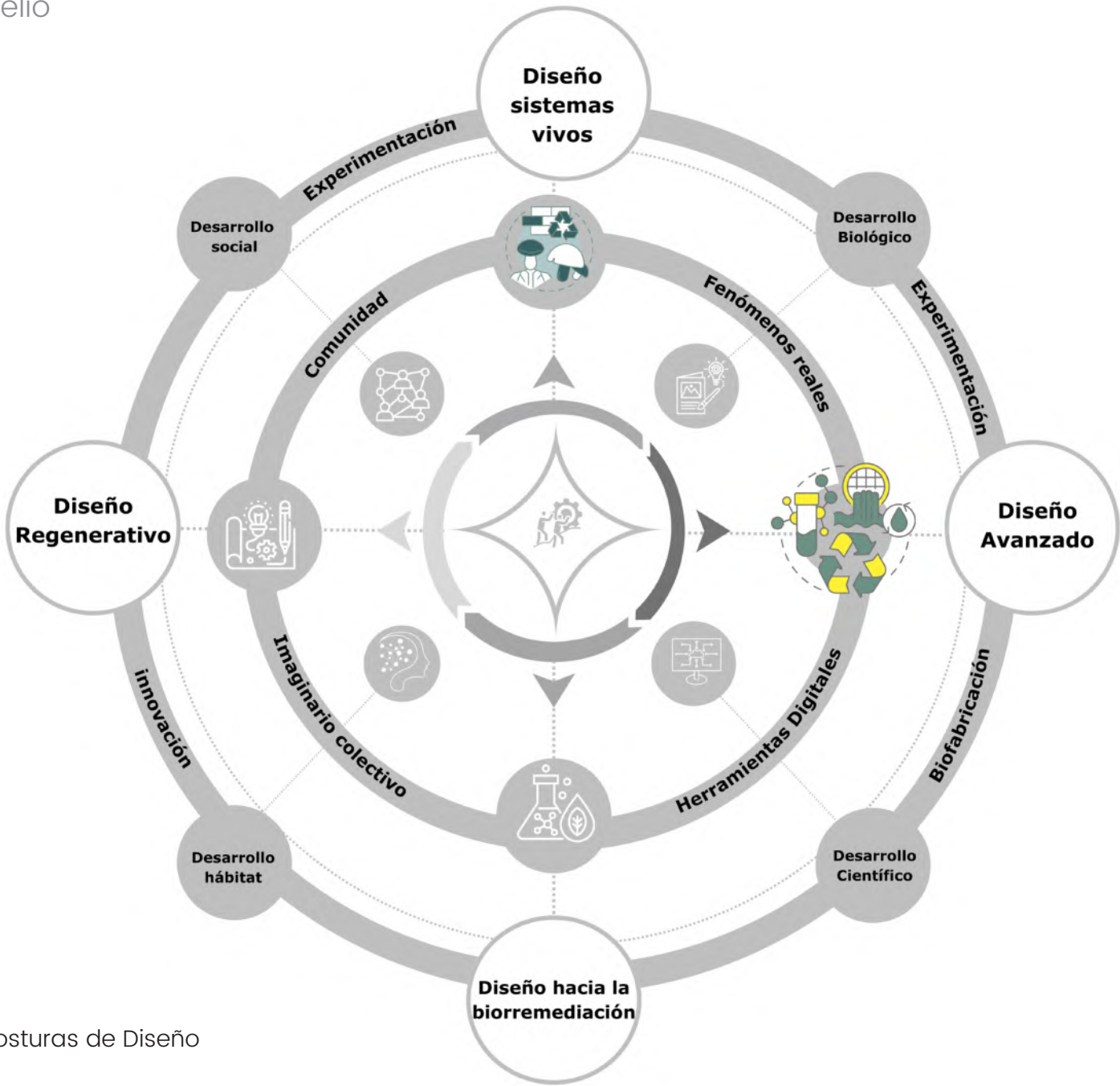


Figura 22. Esquema posturas de Diseño

ITSi

Procesos de biomímesis para el diseño con sistemas vivos

La figura 22, ilustra la aproximación teórica, donde se articulan procesos desarrollados bajo biotecnologías aplicadas en el área del diseño, la implementación de estrategias como la biomímesis para la conceptualización formal de los prototipados diseñados y el proceso de iteración de biomateriales con sistemas vivos, desarrollados bajo parámetros para la regeneración de ecosistemas, esta integración permite definir los procesos que se llevan a cabo en diferentes grupos de investigación con la colaboración de los organismos vivos que requieren de prácticas y procesos diferentes a la fabricación tradicional, por su tiempos de crecimiento y relación con los sistemas vivos.

La biomímesis, busca integrar la ciencia, ingeniería, el arte y el diseño como respuesta a la naturaleza como principal cliente, proyectos del grupo de investigadores como Smith, RSH, Bader, C., Sharma, S., Kolb, D., Tang, TC, Hosny, A., y Oxman, integraron principios de conocimiento natural en el (2020) ellos desarrollaron diversos escenarios con sistemas naturales a resoluciones globales de diseño. En donde se articulan procesos tecnológicos que permitan estudiar las relaciones de estímulos externos como luz, temperatura y la humedad, realizando procesos híbridos, análogos y digitales por medio de la aplicación de herramientas de inteligencia computacional que permiten la simulación de

diversas iteraciones en la composición formal en búsqueda de acercamiento del origen del material al estar compuesto con actores vivos (Smith, RSH, Bader, C., Sharma, S., Kolb, D., Tang, TC, Hosny, A., ... y Oxman, N, 2020).

En la figura 23, se muestra el sistema empleado por investigadores como Doubrovski, EL, Tsai, EY, Dikovsky, D., Geraedts, JM, Herr, H. y Oxman, N, el 2015 de redes que se programan para permitir el crecimiento y expansión de sistemas vivos para el desarrollo de materiales este proyecto emplea colonias de gusanos de seda dispuestos en patrones establecidos para generar membranas biodegradables, estas estrategias funcionan como parámetros anticipados de oportunidades de cambio para desafíos de diseño para el futuro, creando un ciclo constante del biomaterial natural hasta su etapa final como compostaje y regeneración. En el desarrollo de estos diseños se llevaron a cabo a partir de procesos experimentales en los cuales se obtuvieron soluciones innovadoras desde las aplicaciones de códigos básicos de programación (Doubrovski, EL, Tsai, EY, Dikovsky, D., Geraedts, JM, Herr, H. y Oxman, N, 2015) que simulan las formas de la naturaleza para estudiar el estudio del sistema vivo.

La biofabricación de materiales es la accesibilidad y abundancia local de materia en proceso de descarte, se han identificado algunos estudios con la implementación de materiales reciclables de procesos de la transformación de la celulosa orgánica en las construcciones, Cabe resaltar que las fibras vegetales se utilizan en materiales compuestos debido a sus características atractivas, como bajo costo, ser renovables, baja densidad, seguridad en su manejo, y

capacidad de ser fácilmente recicladas. También, ofrecen una combinación de rigidez y fuerza. Se han utilizado fibras naturales y artificiales para mejorar la resistencia de los materiales compuestos obteniendo resultados positivos en términos de energía y uso de residuos vegetales y materiales de construcción. (Cabrera, 2022).

la biomimética aplicada a los biomateriales emplea técnicas que buscan transformar los residuos aprovechables de nuestro entorno, integrando parámetros para el desarrollo de características químicas y físicas que garanticen su resistencia, durabilidad y la utilización de recursos que se emplean en el material a la hora de construir, transportar o el costo ambiental cuando se acabe su vida útil y retorne a la naturaleza (Garzón, 2007). Logrando una disminución en la cantidad de afecciones al ecosistema que se realizan en la fabricación de materiales convencionales como los polímeros o plásticos (Garzón, 2007).

Para la obtención del desarrollo sustentable del diseño de un biomaterial es necesario estudiar e identificar las cualidades que deber cumplir el material al ser transformado obteniendo las características óptimas para la implementación en la construcción, como expone Umezawa (2007), el concepto de Biomateriales en Japón surge como una respuesta a la necesidad de abordar los problemas ambientales en la fabricación de materiales. La expansión de las posibilidades humanas implica el desarrollo de materiales que mejoran las propiedades físicas, químicas, térmicas o funcionales para permitir un mayor buscar minimizar los impactos ambientales ocasionados por medio de la reducción del consumo de materiales, con alta demanda de energía, emisión de residuos asociados con el procesamiento de

materia prima y la optimización del confort, los materiales deben ser amigables no solo con el medio ambiente, sino también con las personas que los utilizan.

Por consiguiente, conduce a que la humanidad haga una simbiosis con la naturaleza siendo el soporte fundamental para el mejoramiento de la calidad de vida en conjunto con acciones sociales, variaciones económicas a mediano y largo plazo y prácticas ambientales, otro estudio que evidencia los proceso de elaboración de biomateriales, eficiencia en la producción del biomaterial, donde se busca disminuir la contribución de contaminantes al medio ambiente al implementarlo en el contexto, mencionado por Mostafa y Uddin citada por Cordero en el 2016, donde se estipulan pilares del desarrollo sostenible: Ambiental, Económico y Social; de modo que la calidad de vida de los usuarios se ve reflejado practicas colectivas sustentables que aportan a la calidad de vida y confort de las comunidades (Malacalza, 2017).



Figura 23. Materiales regenerativos, Pabellón de gusanos de sed

ITSi

Diseño de Materiales y Módulos para la Restauración del Agua basados en Redes de Micelio

El diseño de materiales y sistemas orientados a la restauración ecológica del agua utilizando principios biológicos, como las redes de micelio, es una aproximación innovadora que se fundamenta en los procesos simbióticos naturales. El micelio, una estructura subterránea de hongos, se caracteriza por su capacidad para formar redes complejas que facilitan el flujo de nutrientes y agua, lo que puede ser aprovechado para desarrollar materiales sostenibles en el campo de la restauración ecológica (Boddy, 2019). Estas redes de micelio no solo promueven la descomposición de materia orgánica y el reciclaje de nutrientes, sino que también favorecen la filtración de agua,

lo que las convierte en una base idónea para el diseño de sistemas de restauración de aguas contaminadas.

Para diseñar materiales que imiten estas estructuras naturales, es crucial entender las formas y patrones que el micelio genera en su crecimiento. Los estudios de la morfología del micelio han revelado patrones geométricos eficientes en cuanto a la distribución de recursos y el transporte de agua, lo que permite una replicación artificial de estos patrones en la creación de módulos de restauración (Jones, 2019). La densidad del material y la geometría de las redes de micelio son dos factores clave a considerar en el diseño de materiales. Una mayor densidad puede ofrecer un mayor grado de retención de agua, mientras que una geometría específica puede optimizar la distribución y filtración del agua a través de los materiales (Niemelä, 2020). Al integrar estas características físicas con las propiedades biológicas del micelio, se pueden desarrollar módulos que no solo contribuyan a la restauración del agua, sino que también generen un entorno adecuado para la regeneración de ecosistemas acuáticos, creando un ciclo autosostenible de purificación y conservación.

Además de los aspectos físicos y geométricos, la integración de procesos simbióticos en el diseño de materiales de restauración permite la creación de sistemas más dinámicos y resilientes. El micelio, al actuar en simbiosis con otras especies vegetales, establece redes de comunicación que promueven la recuperación de hábitats degradados. Este enfoque simbiótico se puede replicar en sistemas artificiales, donde los materiales diseñados no solo dependen de procesos físicos de filtración, sino también de interacciones biológicas que favorezcan la regeneración del ecosistema circundante (Schuman, 1987). Así, los

materiales basados en micelio no solo tienen la capacidad de purificar y restaurar el agua, sino que también sirven como agentes facilitadores de la recuperación de otros recursos naturales, como el suelo y la biodiversidad. Esto convierte a los sistemas basados en micelio en una opción prometedora para la restauración ecológica, adaptándose de manera flexible a diferentes entornos y necesidades.

Por su parte la biomímesis, en su esencia, es la imitación de los procesos naturales para resolver desafíos humanos. En el contexto del diseño de materiales y sistemas sostenibles, esta disciplina ha adquirido relevancia en la restauración ecológica, especialmente a través de las redes de micelio. El micelio, una estructura subterránea de los hongos, se caracteriza por su capacidad para formar redes altamente organizadas que funcionan de manera eficiente en el transporte de agua, nutrientes y recursos dentro de un ecosistema. Su capacidad para interactuar con otros organismos en procesos simbióticos, como la mejora del suelo y la filtración de contaminantes, lo convierte en un modelo ideal para el diseño de sistemas vivos destinados a la restauración de aguas contaminadas (Haneef, 2020). Los principios de la biomímesis, basados en la observación de la naturaleza, nos permiten comprender cómo estas redes de micelio pueden ser replicadas para crear materiales y módulos capaces de purificar el agua y regenerar ecosistemas acuáticos de manera autosustentable.

El estudio de la morfología de las redes de micelio ha demostrado patrones de crecimiento altamente eficientes que se pueden adaptar en el diseño de materiales y módulos con fines ambientales. Las redes de micelio forman estructuras geométricas complejas pero eficientes que



Figura 24. Materiales regenerativos,

permiten la distribución óptima de recursos, la absorción de agua y la descomposición de materia orgánica (Boddy, 2019). Ver la Figura 24 Estos patrones geométricos, que incluyen una alta porosidad y conexiones entre diferentes puntos de la red, permiten replicar las condiciones de flujo de agua en un material artificial. La biomímesis de estas redes implica no solo la imitación de su forma y estructura, sino también su funcionalidad. Al integrar características como la porosidad controlada y la densidad del material, es posible diseñar módulos capaces de filtrar agua y recuperar nutrientes, promoviendo la regeneración de ecosistemas acuáticos y minimizando el impacto de la contaminación hídrica (Schuman, 1987).

Una de las características fundamentales del micelio es su capacidad para formar relaciones simbióticas con otros organismos, lo que favorece la regeneración de ecosistemas de manera colaborativa. En la naturaleza, el micelio interactúa con las raíces de las plantas en un proceso conocido como micorriza, en el cual el hongo proporciona nutrientes a las plantas mientras recibe a cambio compuestos orgánicos esenciales para su crecimiento (Tellería, 2017). Este principio simbiótico se puede aplicar en el diseño de sistemas vivos para la restauración del agua, en los cuales los módulos no solo actúan como filtros pasivos, sino que también fomentan la regeneración activa del ecosistema. Los materiales diseñados con micelio pueden funcionar de manera sinérgica con otros organismos, creando un sistema de restauración que no solo depura el agua, sino que también promueve la biodiversidad y mejora la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y terrestres (Schuman, 1987)

La implementación de este enfoque biomimético ofrece

ventajas significativas en términos de sostenibilidad y adaptabilidad. Los materiales diseñados a partir de redes de micelio no requieren grandes cantidades de energía ni recursos para su fabricación, lo que los convierte en una opción ecológica y económica para proyectos de restauración de agua (Haneef, 2020). Además, estos sistemas pueden ser escalados y adaptados a diversos entornos, desde zonas urbanas hasta áreas rurales o regiones afectadas por la contaminación. La flexibilidad de los módulos basados en micelio permite su implementación en una amplia variedad de contextos, optimizando su efectividad según las condiciones ambientales locales. Este tipo de diseño ofrece un camino hacia una restauración ecológica más eficiente, en la cual los sistemas vivos no solo cumplen una función tecnológica, sino que se integran al ciclo natural de regeneración y restauración del medio ambiente.

ITSi

Diseño de Materiales y Módulos para la Restauración del Agua basados en Redes de Micelio

El acto ecológico evolutivo en diseño regenerativo redefine la posición de la diseñadora como aprendiz o colaboradora con organismos vivos, no como autora sobre ellos. Desde esta postura, el micelio opera no sólo como material de filtración, sino como mentor biológico. Se aprende de su capacidad de autoorganización, adaptación al estrés, sinergia con comunidad microbiana. Las metodologías emergentes observación intensiva, prototipado iterativo, conocimiento ecológico situado permiten co-diseñar biofiltros que no son artefactos fijos, sino nodos vivos de regeneración.

En línea con lo argumentado por J.T. et al. (2023), la integración del conocimiento ecológico local fortalece estos diseños; según Blanco et al. (2021), incorporar biomímesis a nivel ecosistémico ofrece modelos útiles para construir entornos que funcionen como ecosistemas. Roös (2020)

plantea patrones adaptativos como herramientas concretas para responder al cambio. Dumitrescu et al. (2021) muestran estrategias de implementación que ubican el diseño regenerativo en la práctica arquitectónica. En síntesis, la práctica del diseño vivo confronta y trasciende la mitigación: se trata de regenerar, aprender, co-crecer con vida, restaurar flujos vitales del planeta desde el agua hasta la diversidad biológica

El pensamiento ecológico contemporáneo ha reconocido que los sistemas vivos evolucionan en red, sosteniéndose mediante relaciones de interdependencia y coevolución. Tal como sostienen Capra y Luisi (2014), los organismos no pueden comprenderse de manera aislada, sino como nodos dentro de una trama de relaciones metabólicas y simbióticas que configuran la vida. Bajo este marco, el diseño regenerativo debe asumir la interdependencia como principio estructural: cada intervención humana modifica el equilibrio de múltiples agentes, desde microorganismos hasta ciclos atmosféricos. En el caso del biofiltro de micelio, reconocer esta red implica concebirlo no como un dispositivo técnico cerrado, sino como una extensión viva del ecosistema, donde agua, micelio, bacterias, minerales y vegetación coevolucionan para restablecer los flujos vitales del entorno.

La adaptabilidad y resiliencia emergen como atributos esenciales en este tipo de diseño. Los organismos vivos reaccionan ante perturbaciones, ajustando su metabolismo para mantener la homeostasis ecológica. Según Walker y Salt (2012), la resiliencia ecológica es la capacidad de absorber cambios sin perder funcionalidad sistémica. Aplicado al biofiltro de micelio, este principio se traduce en diseñar infraestructuras vivas capaces de adaptarse a distintas

concentraciones de contaminantes, variaciones de pH, temperatura o humedad. Un biofiltro verdaderamente vivo no busca la estabilidad rígida, sino la plasticidad metabólica: responde, se transforma y aprende del medio, reproduciendo los mecanismos adaptativos de la propia naturaleza.

El tercer principio, la participación con lo vivo, constituye un cambio paradigmático en la práctica del diseño. Haraway (2016) y Myers (2020) proponen abandonar la idea del organismo como material pasivo o recurso, para reconocer su agencia ontológica dentro de procesos de co-creación. En este sentido, el biofiltro de micelio representa un acto de co-diseño interespecie, donde el micelio, las bacterias nitrificantes, los hongos degradadores y la vegetación acuática participan activamente en la constitución del sistema. El diseñador no controla, sino que facilita condiciones de coexistencia, habilitando un diálogo material y metabólico que convierte al biofiltro en una comunidad simbiótica más que en un objeto de ingeniería.

El conocimiento ecológico situado, también conocido como place-based knowledge, introduce la dimensión territorial del diseño. Cada ecosistema contiene una memoria biocultural, una inteligencia adaptada a sus condiciones climáticas, geológicas y sociales. Escobar (2018) sostiene que un diseño verdaderamente regenerativo debe surgir del lugar, no imponerse sobre él. En consecuencia, el biofiltro de micelio debe incorporar especies fúngicas locales, sustratos provenientes del territorio (como arcillas, carbones vegetales, sedimentos naturales) y prácticas comunitarias de manejo del agua. Esta integración garantiza que el sistema no sólo sea eficiente, sino ecológicamente congruente y culturalmente relevante,

enraizado en los saberes locales sobre regeneración hídrica.

Finalmente, el principio de transformación en vez de mitigación redefine el propósito mismo del diseño. Mientras que la sostenibilidad tradicional busca reducir daños, el enfoque regenerativo se orienta a restaurar las capacidades evolutivas de los ecosistemas (Mang & Reed, 2012). El biofiltro de micelio, en esta perspectiva, no pretende simplemente filtrar contaminantes, sino reactivar procesos ecológicos dormidos, devolviendo al agua su capacidad de sostener vida. Este desplazamiento de lo “correctivo” a lo “regenerativo” implica comprender el diseño como una práctica evolutiva, una forma de aprendizaje colectivo donde humanos y organismos no humanos colaboran en la reconstrucción de la biosfera.

En suma, el desarrollo de un biofiltro de micelio desde estos cinco principios propone un modelo de diseño vivo, adaptativo y relacional, en el que la práctica proyectual se convierte en un acto de cuidado y coevolución. La interdependencia de los sistemas, la resiliencia biológica, la colaboración con organismos, el arraigo territorial y la búsqueda de regeneración conforman un marco epistemológico que trasciende el diseño como técnica para situarlo como práctica de reciprocidad ecológica. En esta dirección, el biofiltro no sólo remedia el agua: repara vínculos entre la vida y el pensamiento del diseño, abriendo la posibilidad de un futuro donde diseñar signifique, esencialmente, aprender a coexistir.



Estructura

de Investigación

Bases de investigación y desarrollo del biofiltro

Investigación

Objetivos



El **Capítulo 3** titulado **"Bases de investigación y desarrollo del Biofiltro de Micelio"** contiene el cuadro de congruencia en donde se menciona la hipótesis planteada, la preguntas problema, el objetivo general y el desglose de los objetivos específicos, también se enmarca la metodología general del estudio y las metodologías específicas empleadas en la investigación.

Métodos

Sistemas vivos



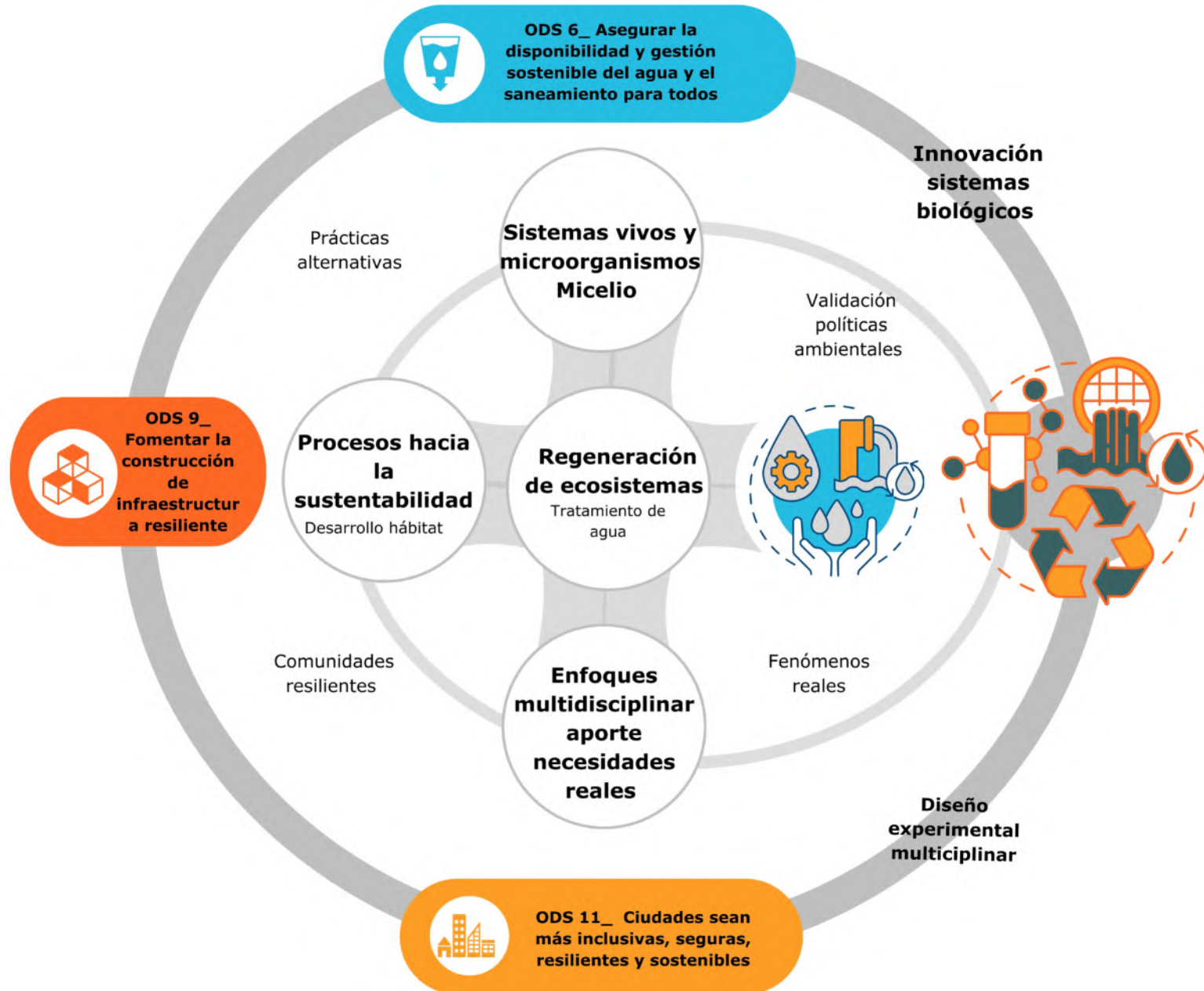


Figura 25. Justificación, ODS

ITSi

Justificación

Es urgente necesidad de reducir la contaminación en las cuencas hídricas, donde la presencia de metales pesados y otros contaminantes representan una amenaza para los ecosistemas acuáticos y la salud pública (Brichetti, 2021). A través del diseño de biofiltros de micelio, este estudio propone una estrategia innovadora hacia procesos de biorremediación basada en el uso de microorganismos miceliales de especies de hongos, capaces de absorber y degradar estos contaminantes de manera natural y sostenible. La aplicación de esta tecnología no solo contribuirá a la mejora significativa de la calidad del agua, sino que también fomentará el desarrollo de soluciones ecológicas y regenerativas para la restauración de los cuerpos de agua afectados, fortaleciendo el vínculo entre la ciencia, la sostenibilidad en la figura 25 se articula las esferas de impactos asociados al desarrollo del proyecto, se enmarca en el desarrollo de los objetivos sostenibles y las prácticas alternativas para el saneamiento del agua.

Para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la asequibilidad, resiliencia y sostenibilidad, no basta con invertir en infraestructura. También es necesario mejorar el acceso y la calidad de los servicios de agua, saneamiento y tratamiento de aguas

residuales (Cabrera, 2022). Esto requiere un enfoque integral que considere tanto los aspectos técnicos como sociales (Brichetti, 2021). Este tipo de inversión no solo mejora la infraestructura, sino que también permite soluciones innovadoras y adaptativas. Por eso, es importante dar prioridad a tecnologías sostenibles y a la innovación lo que contribuirá al avance hacia el ODS 6, que busca asegurar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos; el ODS 9, que fomenta la construcción de infraestructura resiliente, la industrialización sostenible y la innovación; y el ODS 11, que aspira a que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. En este sentido, el desarrollo de un biomaterial vivo que pueda incorporarse a infraestructuras públicas y domésticas representa una alternativa innovadora. Este biomaterial podría mejorar el saneamiento y la calidad del agua, apoyando así el cumplimiento de los ODS y el cuidado del medio ambiente (Brichetti, 2021).

Los biofiltros de micelio son una estrategia fundamental para la biorremediación del agua porque aprovechan la capacidad natural de los hongos para descomponer compuestos orgánicos y retener metales pesados, funcionando como sistemas vivos de filtración. Su estructura porosa actúa como una red que captura contaminantes mientras transforma residuos en nutrientes aprovechables para otros organismos, generando procesos regenerativos en lugar de soluciones temporales. Además, su bajo costo, biodegradabilidad y fácil integración en ecosistemas locales los convierten en una herramienta accesible y sostenible para restaurar la calidad del agua en comunidades y entornos naturales.

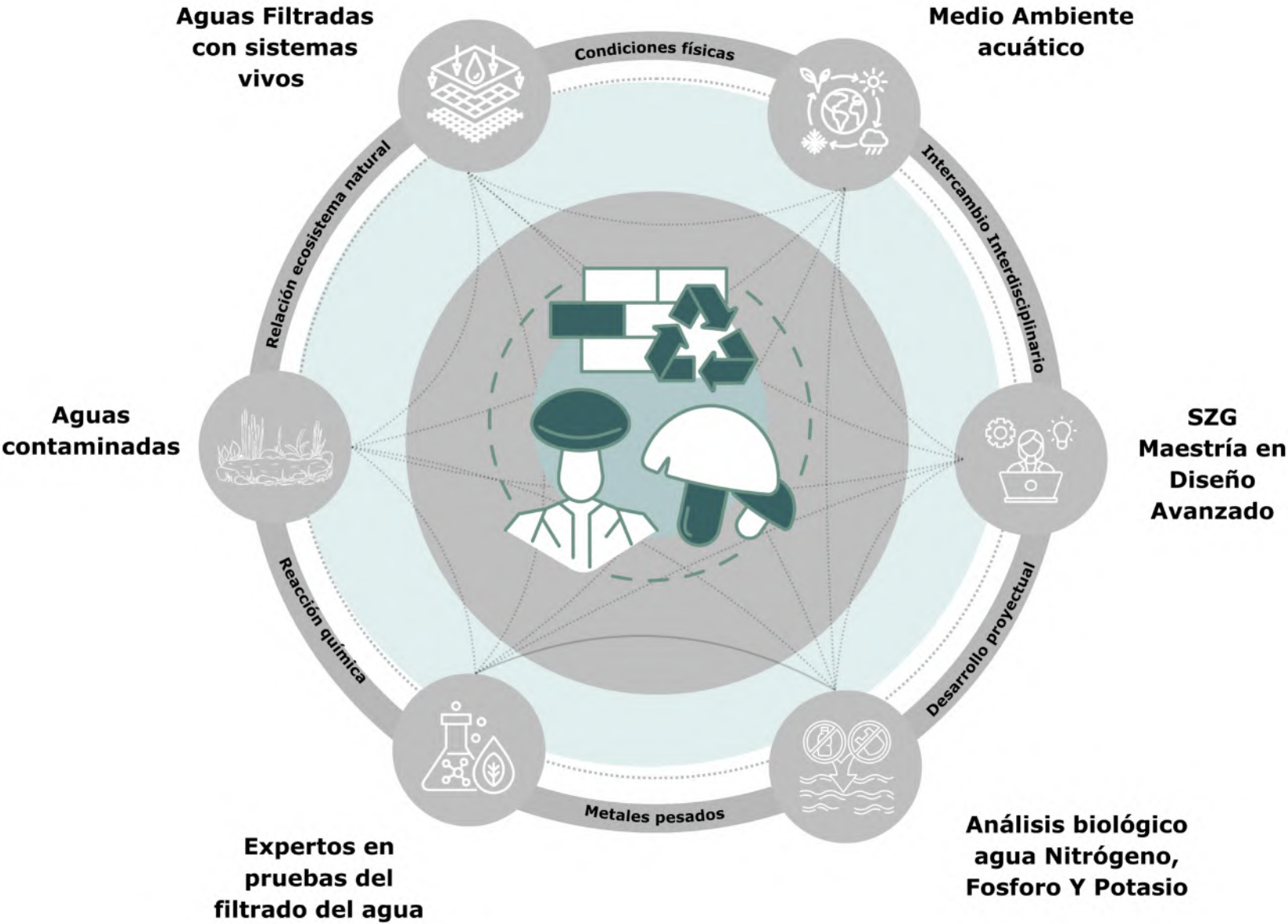


Figura 26. Actores Involucrados

ITSi

Actores Involucrados

Enfoque Multidisciplinario: Actores involucrados en la investigación

La identificación de los actores clave en proyectos multidisciplinarios enfocados en la regeneración ecosistémica es un proceso esencial para garantizar el éxito de la intervención, especialmente en proyectos de biorremediación de las condiciones del agua contaminada. En el caso de este proyecto, la identificación de actores se realizó en colaboración con un equipo multidisciplinario compuesto por expertos en Recursos naturales acuáticos, biología, química, materiales, ciencias ambientales y Diseño, lo que permitió un enfoque holístico en el desarrollo de soluciones innovadoras para la remediación de aguas contaminadas. A lo largo de la investigación, los actores clave fueron seleccionados en función de su experiencia y capacidad para abordar los diferentes aspectos técnicos y ambientales del proyecto. La colaboración entre estos actores facilitó la integración de conocimientos tradicionales

con avances tecnológicos, lo que permitió definir una estrategia adecuada para el diseño de biomateriales capaces de degradar contaminantes presentes en el agua.

El proceso inicial del proyecto se desarrolla bajo parámetros específicos de materiales contaminantes presentes en el agua como el Nitrógeno, Fósforo y Potasio para esto se articula diversas áreas del conocimiento, en la Figura 26, se ilustra la participación de los actores principales, destacando su potencial en el desarrollo de la investigación. Además, esta colaboración interdisciplinaria permitió el diseño y la creación de prototipos para el desarrollo del filtrado del agua con sistemas vivos, alineando los resultados con los objetivos de sostenibilidad y regeneración ecológica establecidos desde el inicio del proyecto (Plattner, 2010). Este enfoque no solo refuerza la importancia de los actores clave en el proceso de innovación, sino que también subraya la necesidad de integrar estrategias que favorezca la regeneración ecológica a través de la colaboración y el intercambio de conocimientos entre disciplinas y organismos vivos como el micelio.

Es relevante mencionar la vinculación con laboratorios especializados para el desarrollo de la etapa de validación de las condiciones del agua, como el centro de investigaciones en electroquímica CIDETEQ, en la ciudad de Querétaro y de tratamiento de agua para las etapas de filtrado y validación, el Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales INIRENA en el Laboratorio de Ecología Acuática de la ciudad de Morelia Michoacán. En donde se llevó a cabo el sistema de filtrado de agua.

ITSi

Biofiltro Micelio

Cuadro de Congruencia

Hipótesis

La implementación de un biofiltro a base de micelio en el tratamiento de aguas contaminadas disminuirá la concentración de materiales como el Nitrógeno, Fósforo y Potasio, evidenciando su aporte al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 9 y 11.



Preguntas de investigación

¿Qué características físicas debe tener el diseño del biomaterial de micelio para reducir los contaminantes y mejorar el saneamiento del agua en cuerpos de agua naturales?

Objetivo general

Diseñar y Desarrollar biofiltros de micelio para la biorremediación de las aguas contaminadas Nitrógeno, Fósforo y Potasio, evaluando su eficacia en la mejora de la calidad del agua, contribuyendo a la preservación de los recursos hídricos y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos específicos

- 1. Identificar especies de hongos** locales con potencial para la producción de micelio, con base en la capacidad para la biorremediación y determinando su disponibilidad y abundancia en la región.
- 2. Diseñar prototipos de biofiltro** utilizando micelio, adaptado a las condiciones micelio vivo Y biobasado.
- 3. Construcción del Microcosmos del cultivo de micelio** para el filtrado por edades del agua con presencia de contaminantes (N, P, K).
- 4. Implementar pruebas de validación** de las condiciones del agua y degradación de nutrientes del agua Filtrada.

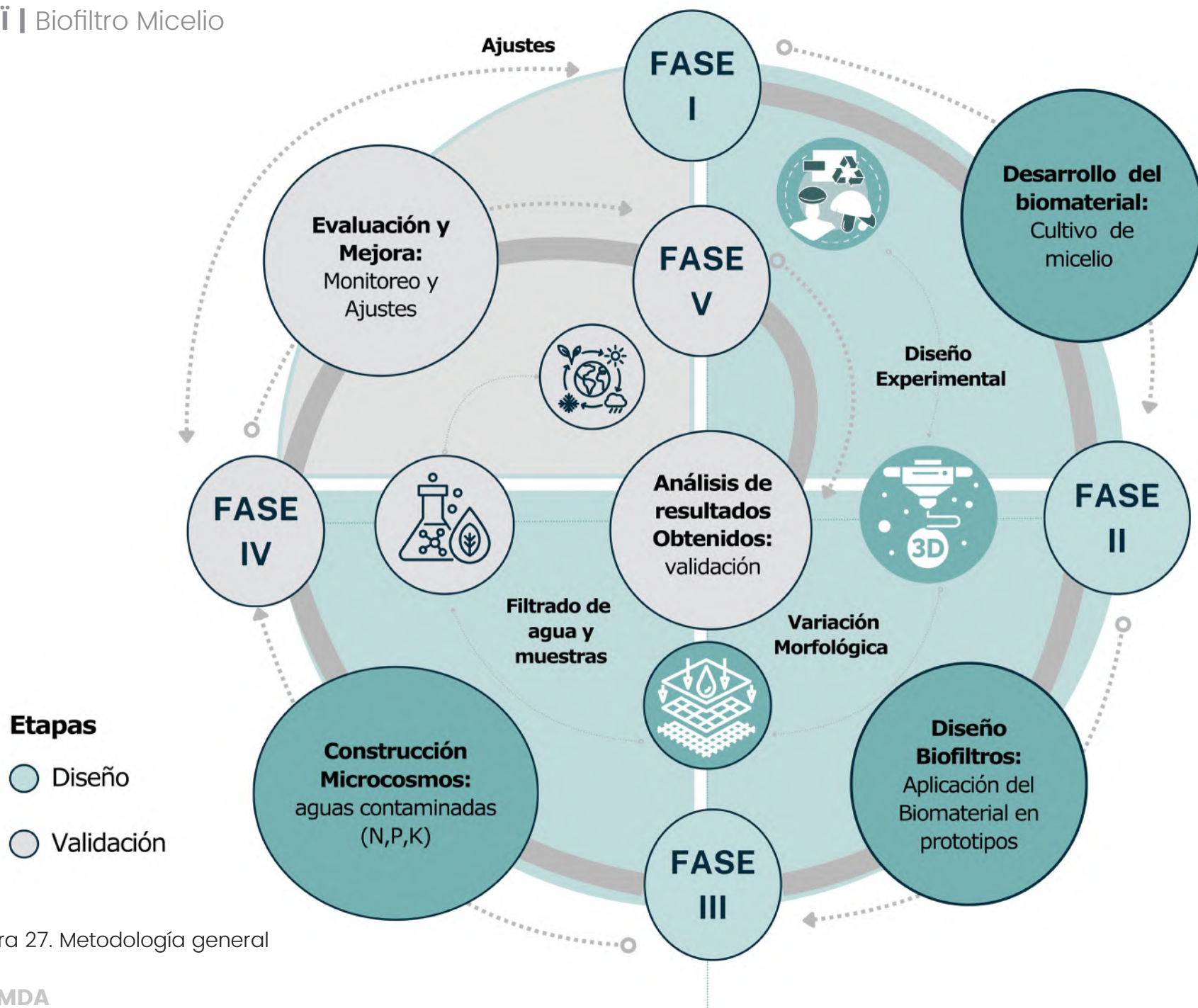


Figura 27. Metodología general

ITSi

Metodología

En la figura 27, ilustra el esquema de la metodología general en donde se describe las cinco fases del proyecto de investigación, cada una orientada al diseño de un biomaterial basado en micelio para el tratamiento de aguas contaminadas. La Fase I se centra en el crecimiento del cultivo y vida del micelio, asegurando que el biomaterial desarrollado posea propiedades necesarias para su aplicación. En la Fase II es donde se diseñan y desarrollo de biofiltros con el biomaterial desarrollado, evaluando su desempeño en diversas escalas. En la Fase III, se construye un microcosmos para el filtrado del agua con presencia de nitrógeno, Fósforo y Potasio. La Fase IV es la evaluación y validación de contaminantes en el agua. Finalmente, la Fase V incorpora el análisis de los datos obtenidos en las pruebas de validación. Este esquema sintetiza cada uno de estos pasos, destacando su papel integral en la consecución del objetivo general del proyecto articulando las fases principales en el desarrollo del diseño del biomaterial.

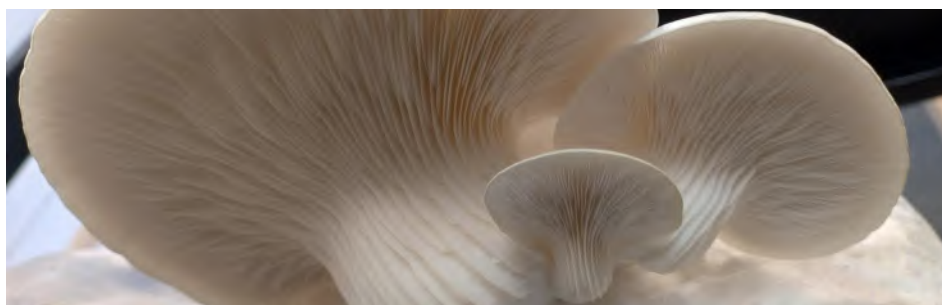


Figura 28. Especies de Hongo Pleurotus Ostreatus

Metodologías específicas de cada fase de investigación:

En este segmento, se describe las metodologías específicas de cada fase, la cual detalla los apartados de la metodología general presentada anteriormente. Esta descripción exhaustiva abarca cada una de las cinco fases esenciales del proceso de desarrollo de diseños experimentales del biofiltro de micelio.

FASE I. Crecimiento del Biomaterial: Cultivo del Micelio

la primera etapa de la metodología se centra en el cultivo y la vida del micelio para su uso como biomaterial en los biofiltros. Se seleccionaron especies de hongos con potencial para la biorremediación, se llevaron a cabo sus cultivos en condiciones controladas para obtener un micelio robusto y eficiente (Gómez, 2020). Se realizaron diferentes cultivos en temporadas del año para evaluar las propiedades físicas de proliferación, crecimiento en tiempo, condiciones ambientales extremas como el verano del año 2025 para el cultivo y la incubación.

La elección de especies para este estudio se enfocó en aquellas que pueden ser cultivadas localmente en el estado de Michoacán. En la Figura 28, se explora la selección de especies de hongos con potencial para la producción de micelio y su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas, incluyendo Lentinula edodes (shiitake), Boryana cheran (identificada en Cherán), Pleurotus Ostreatus (conocidos como setas de ostra) y Ganoderma spp. (hongo reishi), debido a sus propiedades potenciales



Figura 29. Instrumentos utilizados para evitar contaminación en el cultivo



Figura 30. Instrumentos utilizados para evitar contaminación en el cultivo



Figura 31. Agar agar- semillas de base

para la degradación de contaminantes presentes en aguas (Gomez, 2020). Pacones tas especies fue necesario desarrollar diferentes protocolos experimentales como herramienta de seguimiento y control de las condiciones de cultivo para el desarrollo del biomaterial con micelio.

Las cinco especies de hongos seleccionadas para el estudio fueron transportadas de Uruapan a Morelia bajo condiciones estrictas de seguridad para minimizar el riesgo de contaminación como estar almacenadas en un espacio independiente, con control de la humedad, la luz y la temperatura, cada revisión se debía garantizar el equipo de protección para no contaminar las sepas. Cada especie fue etiquetada con precisión y colocada en envases estériles durante el transporte. Este procedimiento aseguró la integridad de las muestras y facilitó su correcta disposición en los espacios del trabajo experimental se ejecutó bajo condiciones básicas en las cuales se garantizaron que la proliferación de las sepas crecieran en periodos de tiempos controlados, se verificaron que las condiciones ambientales y la contaminación por microorganismos fueran aislados en el espacio de trabajo por medio de procesos de limpieza del área, estas características deben ser ideales para la manipulación del hongo para llevar el control de los pasos y los insumos utilizados en la práctica. Inicialmente se realizó la esterilización de las herramientas y se implementaron los objetos de bioseguridad como mascarilla, guantes y alcohol. Se desarrolló un proceso de inoculación en áreas con iluminación contrada y en campanas laminare, ver en la figura 29 se muestra los instrumentos utilizados para evitar contaminación en el cultivo, la desinfección del área de trabajo en cada proceso de sembrado es indispensable

para la inoculación de las especies fúngicas.

Para la preparación del medio del cultivo o el agar, se requieren de ingredientes orgánicos para que las cepas de hongos tengan un medio para proliferar, por su parte, el almidón encontrado en la papa es un compuesto que ayuda en medios como el agar, la miel y la levadura de la cerveza activar sus propiedades a estar mezclados de agua. Se procede a cocinar las papas en un litro de agua. En la figura 30 se observa cómo una vez se haya liberado el almidón y el agua presente tiene un cambio de color, se debe colar el líquido, reservando el caldo restante, se mezclan los ingredientes restantes hasta obtener una solución espesa. Esta mezcla se coloca en baño maría durante 3 horas. Para conservar el preparado por más tiempo, se debe almacenar en un recipiente hermético, en refrigeración, por un máximo de 3 meses. Es fundamental utilizar utensilios y recipientes esterilizados durante todo el proceso para evitar la contaminación cruzada.

Una vez que se ha obtenido el agar, se realiza el proceso de inoculación, en la figura 31 muestra cómo se distribuyen 2 ml en cajas de Petri de 8 cm de diámetro, asegurando una capa uniforme en la base. Es necesario que el agar esté a temperatura ambiente antes de inocular las especies de hongos, para evitar cualquier impacto adverso en su crecimiento. Se toma una muestra del hongo inferior a 1 cm con un instrumento estéril y se coloca en el centro de la superficie del agar. Para evitar la entrada de microorganismos externos, las cajas de Petri deben sellarse herméticamente con cinta Parafilm o un sellador específico para cultivos. El tiempo de crecimiento del hongo varía según la especie,



Figura 32. Agar agar- sembrado en Semillas de trigo



Figura 33. Agar agar- Miel, Caja Petri especie Skitake



Figura 34. Proceso de pasteurización del sustrato

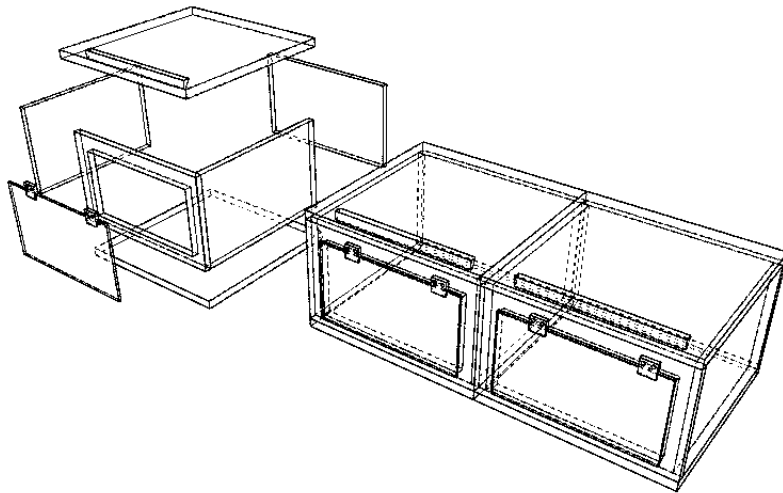


Figura 35. Cajas De acrílico, de 60cm x 35cm de alto

pero la colonización completa de la muestra generalmente se observa después de 15 días de la inoculación. Durante este periodo, las cajas deben mantenerse en condiciones ambientales controladas y de iluminación para asegurar el desarrollo adecuado del hongo.

Para este estudio se seleccionaron diferentes tipos de granos (trigo, lenteja, alpiste y arroz) con el objetivo de evaluar las variaciones en el crecimiento y colonización del micelio según la especie de hongo. En la figura 32, se muestra como la morfología de la colonización variaron significativamente dependiendo del grano utilizado. Para la preparación del grano como soporte para el cultivo micelial, incluye su limpieza con agua hasta eliminar impurezas, desinfección con peróxido de hidrógeno y remojo durante 24 horas. Luego se escurre y reposa para eliminar el exceso de humedad, y se envasa en frascos de vidrio con ventilación controlada. Tras la esterilización en olla a presión o convencional, los frascos se enfrían y desinfectan externamente. La inoculación se realiza con fragmentos de micelio tomados de una placa de Petri, y se agita para lograr una distribución uniforme. El cultivo se incuba a 22°C, se monitorea cada dos días y se agita nuevamente al sexto día. A los diez días, cuando el grano está completamente colonizado, se transfiere al sustrato definitivo (Gómez, 2020).

La Caracterización del sustrato, se muestra en la figura 33 en donde se evaluaron diversas tipologías de sustratos para identificar aquellos que favorecen el crecimiento del micelio. Los sustratos seleccionados debían presentar características específicas, tales como alta concentración

de fibras de celulosa derivadas de madera y desechos orgánicos con propiedades como fósforo, almidón, calcio, hierro, azufre, alcalinidad, cobre y vitamina C, elementos esenciales para la nutrición y colonización del micelio (Gómez, 2020). Los sustratos analizados incluyeron fibras vegetales (hoja de palma, hojarasca de árboles, flores secas), fibras orgánicas (cáscaras de papa y piña), fibras sintéticas (celulosa de cartón y papel) y Fibras Agrícolas (Trigo, Avena, Coco)

Para los sustratos existen diversas formas de esterilización, la implementada para este estudio, el sustrato se desinfecta con procesos de pasteurización en donde la implementación de calor entre 70°-75°C elimina impurezas y toxinas de cada sustrato, Ver la figura 34, en donde se muestra cómo se dispone en una olla de capacidad superior a 10 litros llenándose con agua limpia $\frac{3}{4}$ de su capacidad, por aproximadamente 3 horas a fuego lento controlando la temperatura constante, luego de este periodo la fibra se lleva a escurrir durante 8 horas para obtener una humedad del 70%. La incubación con el micelio se realiza con fragmentos de semilla de micelio previamente colonizado, que se colocan por medio de capaz intercaladas con nutrientes como el carbonato de calcio y yeso que evitar la generación de impurezas en el cultivo y permite el crecimiento del micelio de forma homogénea en cada recipiente o molde.

El Hábitat del hongo o el lugar de almacenamiento e incubación debe garantizar estar aislado de microorganismos externos, ver en la figura 35 donde se muestra una exploración digital sobre el diseño del hábitat creado a



Figura 36. cajas móviles



partir de cajas móviles acrílicas, cada recipiente deberá estar cerrado, pero permitiendo que pueda entrar oxígeno que garantice que el hongo crezca, es importante hacer el seguimiento respectivo para procesos de contaminación cruzada, se deberá desechar la exploración para garantizar que el hongo colonice el sustrato (Gómez, 2020). El cultivo se incubó en un ambiente seco, oscuro y a 22 °C a 27°C, revisándose cada seis días. A los quince días, si el sustrato está completamente colonizado, se transfiere al molde final. En la figura 36 se muestra la relación de las cajas móviles y las características para garantizar las condiciones del sembrado del micelio, se busca controlar elementos como la humedad temperatura e iluminación durante el proceso de siembra y al proceso de incubación en cuarto oscuro.

Por su parte en la figura 37, se realiza una ilustración de las etapas que se deben realizar en el momento del cultivo con micelio, estas condiciones varían según la fibra seleccionada y los tipos de cepas, el trabajo experimental se realizó en condiciones controladas para asegurar el crecimiento óptimo del micelio, aplicando medidas de bioseguridad y esterilización para evitar contaminación. Las cepas fúngicas, principalmente *Pleurotus Ostreatus*, fueron inoculadas en fibras agrícolas y cultivadas en bolsas selladas en oscuridad durante 15 días. Se controlaron factores como humedad, temperatura (20-27 °C) y oxigenación, observando variaciones en el crecimiento según el tipo de semilla utilizada. Se emplearon microcosmos móviles y membranas oscuras para optimizar la proliferación del micelio, asegurando condiciones adecuadas para su uso en tratamientos de aguas residuales.

Figura 37. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia

ITSi

Diseño y Prototipos

metodología combina ciencia y creatividad para desarrollar soluciones funcionales, sostenibles y escalables, alineadas con la innovación responsable.

FASE II. Diseño y desarrollo de prototipos de Biofiltros de micelio:

En esta etapa, se desarrolló la construcción de biofiltros utilizando el biomaterial basado en micelio desarrollado previamente en diversas escalas y moldes.

El estudio se estructura en fases secuenciales basadas en Design Thinking, favoreciendo una aproximación empática, iterativa y enfocada en soluciones ambientales a través de la innovación biotecnológica (Brown, 2013). Emplea una metodología híbrida que integra el concepto de Digital Draft, donde el intercambio de información entre objeto y diseñador genera múltiples posibilidades y aprendizajes creativos (Oxman, 2017). Asimismo, se guía por teorías de artesanear lo digital (Becerra-Santacruz, A. & Becerra-Santacruz, H., 2023), enfocadas en redescubrir y enriquecer los procesos de diseño mediante la interacción con sistemas vivos como el micelio de *Pleurotus Ostreatus*. En la figura 38, se ilustra la relación de estas posturas. En las fases iniciales, se realiza el proceso de empatizar la necesidad de sistemas sustentables para las aguas contaminadas, seleccionando y caracterizando micelio con potencial en biorremediación. Luego, en Idear, Prototipar y Evaluar, se diseña el biofiltro usando herramientas digitales como Rhinoceros y Grasshopper para optimizar su morfología y estructura, mejorando la retención de contaminantes. La

A.Empatizar-Idear: Diseño de Moldes Digitales

El diseño y la fabricación del biomaterial basado en micelio se llevaron a cabo mediante un enfoque escalonado que integró análisis exhaustivos y un proceso iterativo de prototipado. La primera fase incluyó la conceptualización y el desarrollo de visualizaciones analógicas en 3D, utilizando representaciones gráficas que facilitaron la exploración de diversas formas y estructuras morfológicas del material. Estas visualizaciones fueron cruciales para comprender cómo el micelio podría adaptarse a las condiciones necesarias para su aplicación, tales como la absorción de los contaminantes y la interacción con el ecosistema acuático. Simultáneamente, se llevaron a cabo exploraciones avanzadas en el ámbito digital, utilizando herramientas sofisticadas de modelado 3D para perfeccionar las geometrías propuestas, asegurando así una alta precisión en la replicabilidad de los prototipos. La implementación de tecnologías digitales permitió simular el comportamiento del material en diversas condiciones, lo cual fue fundamental para optimizar tanto su estabilidad como su funcionalidad.

Una vez obtenido un micelio saludable de 30 días de vida mínimo se podrá disponer en moldes y recipientes específicos, este diseño deberá cuidar las variables de esterilidad y oscuridad para la obtención de materiales biobasados de micelio para esto, se diseña el biofiltro a

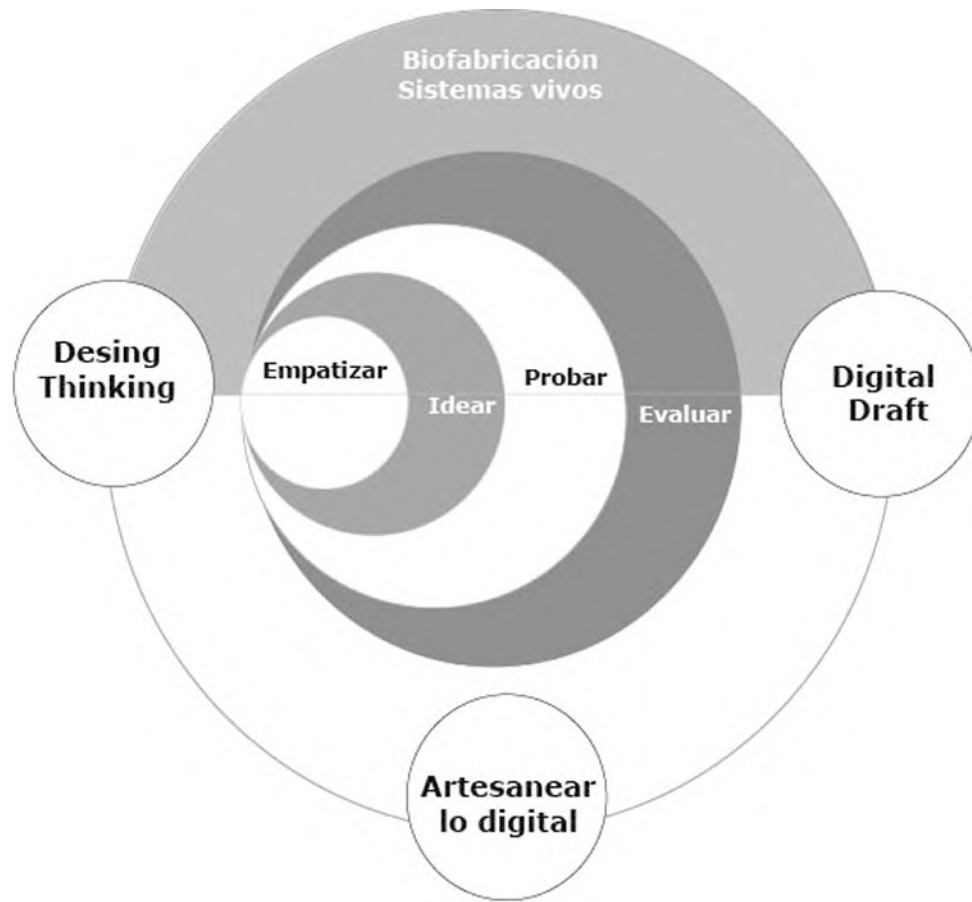


Figura 38. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia

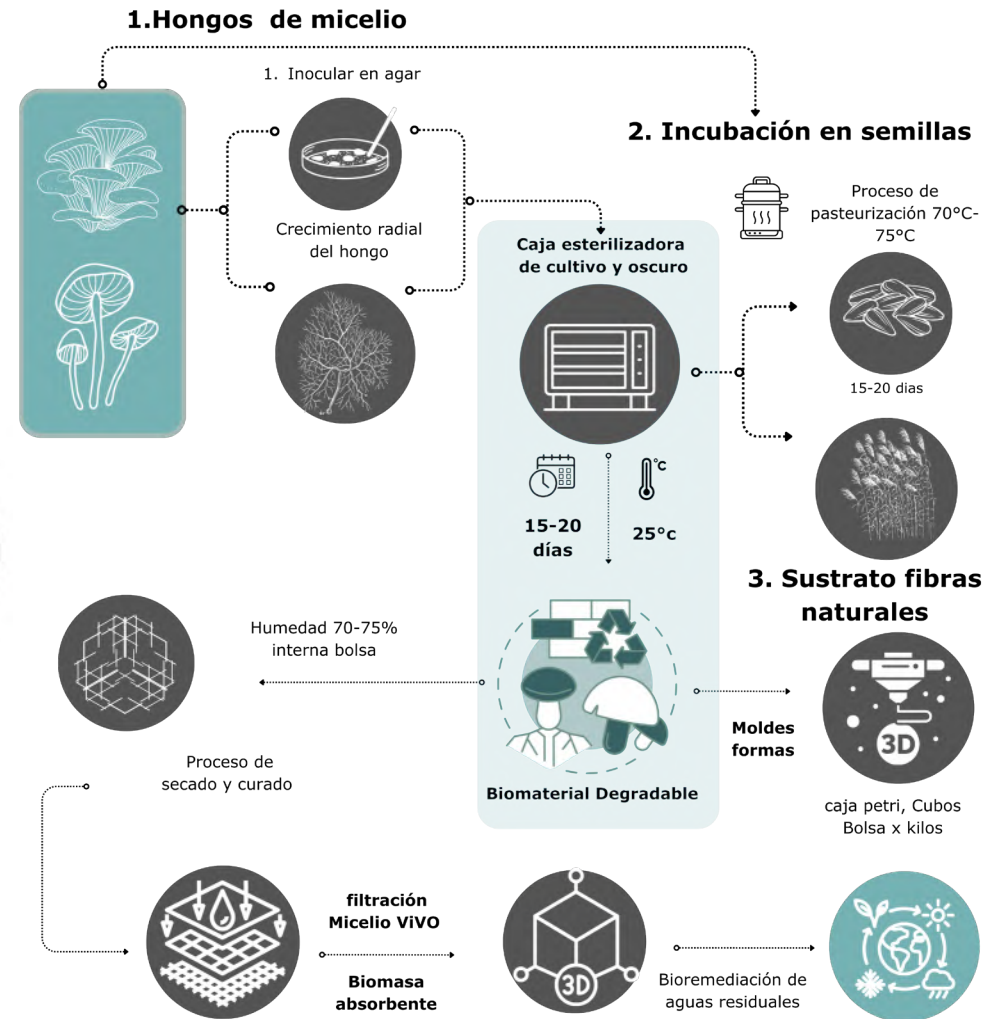


Figura 39. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia

partir de las características que se deben garantizar para la proliferación del biomaterial optimizado su crecimiento del sistema vivo, en la figura 39 se observa el desarrolló de prototipos físicos análogos y simulaciones digitales que permiten explorar múltiples soluciones. Se implementaron herramientas como Rhinoceros y Grasshopper para modelar la morfología del micelio y explorar configuraciones estructurales del biofiltro, considerando variables como porosidad y geometrías.

Para la fabricación del prototipo, se aplicaron técnicas de fabricación digital, como la impresión 3D, que posibilitaron la creación de moldes base con alta precisión y replicabilidad. Este enfoque híbrido, que combinó técnicas tradicionales con métodos digitales avanzados, facilitó la creación de prototipos funcionales y escalables, al tiempo que permitió una evaluación continua y la mejora del diseño del biomaterial (García et al., 2022; Vázquez et al., 2018).

B.Prototipar. Construcción análoga de moldes

los módulos de micelio pueden ser diseñados con una porosidad controlada que permita la absorción de contaminantes presentes en cuerpos de agua, como metales. pesados, nutrientes en exceso y otros compuestos tóxicos (González et al., 2020). Los “llenos y vacíos” en la estructura del micelio, inspirados en los patrones de crecimiento de las raíces como generan una red de poros que facilita no solo el paso de agua y nutrientes, sino que también crea un entorno propicio para la proliferación de microorganismos beneficiosos que contribuyen a la purificación del agua.

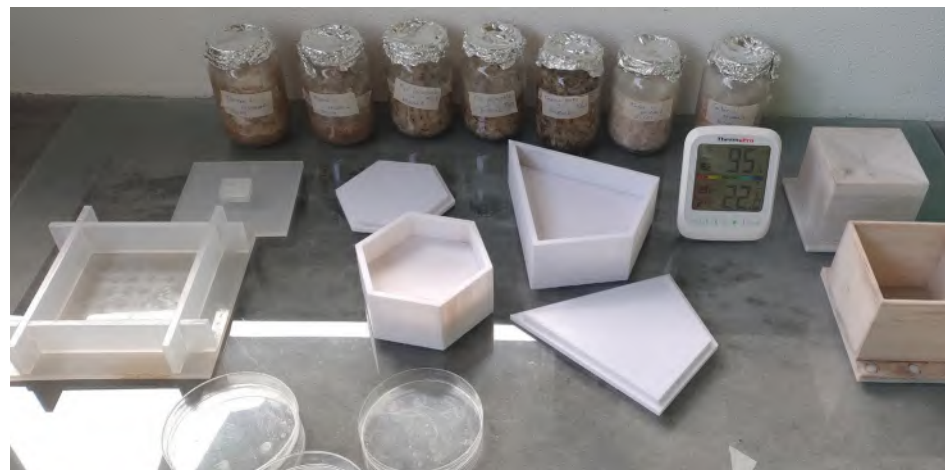


Figura 40. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia



Figura 40. Diseño experimental proceso de producción. Fuente: Autoría propia

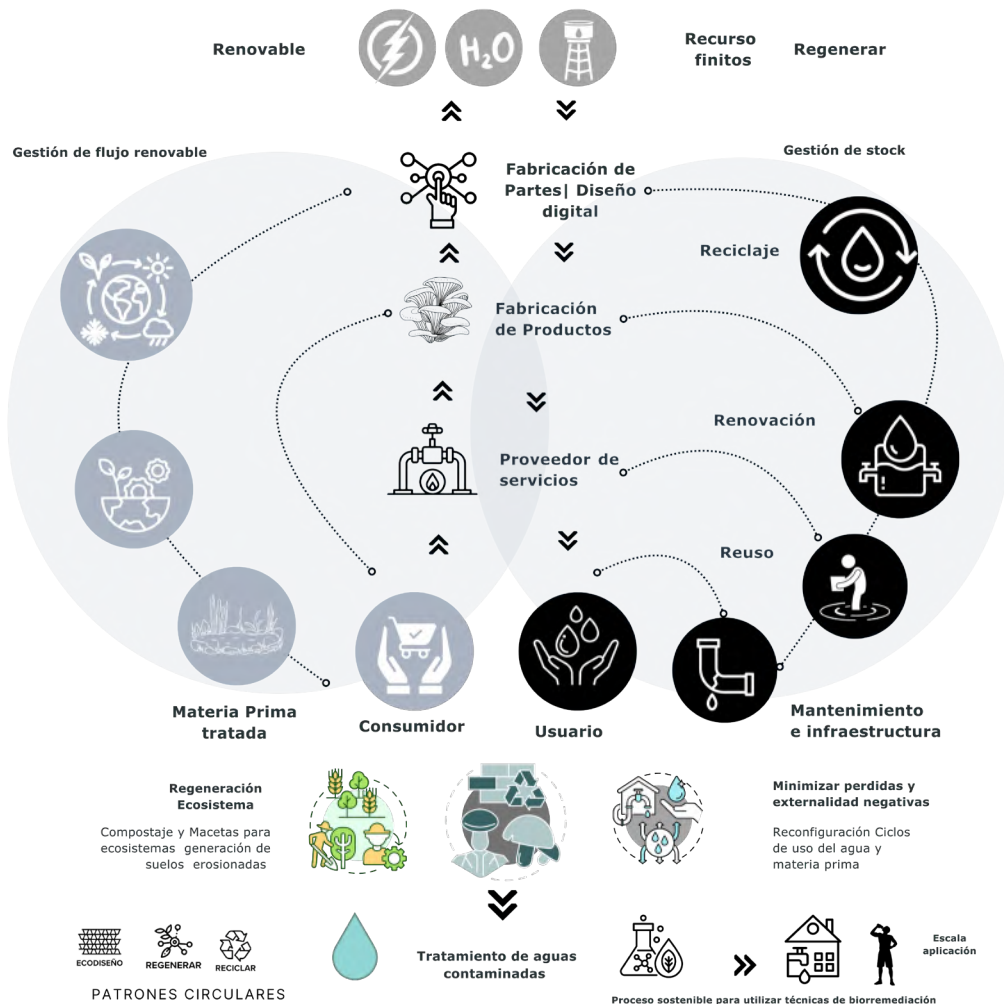


Figura 41. Procesos de sostenibilidad y fases de aplicación

En la figura 40 se observan las diversas variaciones morfológicas de para la disposición del micelio, era importante que el cultivo tuviera un desarrollo previo antes de la incubación en moldes finales objetuales, el bienestar del cultivo garantiza que las piezas se obtengan de forma controlada y sin contaminaciones, la integración de herramientas digitales fue esencial para la disposición final del micelio en sus escalas y alternativas de aplicación al filtrado de agua. Se estudiaron diversos tipos de moldes desarrollarlos con herramientas digitales.

C.Evaluar y redefinir. Crecimiento redes miceliales y circularidad

Se estudio las condiciones del crecimiento y colonización de las redes miceliales en diversos esfuerzos generados por formas, y materialidades, integrando estrategias que llevaron a controlar de la materialidad, control y forma, se desarrollaron varios procesos de iteración de diseño para llegar a las exploraciones finales, esta etapa la que permite que el sistema vivió informa de sus condiciones y estructuras de crecimiento, redefiniendo parámetros y ajustando el diseño para la obtención de la forma del biofiltro.

Para el desarrollo de un objeto con características regenerativas es necesario integrar los procesos de circularidad aplicados a la producción y remediativas de ciclos de vida del agua contaminada son fundamentales para la sustentabilidad ambiental, ya que permiten un uso más eficiente de los recursos naturales y promueven la

recuperación de ecosistemas acuáticos. Este modelo de economía circular no solo busca minimizar el desperdicio de agua y materiales, sino que también se enfoca en crear un ciclo de regeneración donde las tecnologías y prácticas de tratamiento de agua se optimizan constantemente. Según Zeng et al. (2021) la circularidad en el tratamiento de aguas residuales ofrece beneficios significativos al integrar procesos que permiten la reutilización del agua tratada en diversas industrias y comunidades. En la Figura 41 se ilustra el diagrama mariposa en el cual relaciona los modelos circulares, los problemas inmediatos de contaminación, sino que también permiten la restauración de los ecosistemas acuáticos, un componente crucial para la conservación de la biodiversidad y la protección de los recursos hídricos. La implementación de estas estrategias puede contribuir a la regeneración ecológica mediante el uso de soluciones naturales y tecnologías innovadoras, lo que facilita la creación de un sistema de agua sostenible y regenerativo a largo plazo (Almeida et al., 2022). Este enfoque, a su vez, promueve la adaptación de las comunidades locales a través de procesos de producción replicables y de bajo costo, permitiendo el empoderamiento de los actores locales y el fortalecimiento de sus capacidades en la gestión del agua (Borg et al., 2019).

Para finalizar en la figura 42, se muestra el esquema que resume el proceso de desarrollo de diseño implementado en el proyecto, desde las fases de producción el biomaterial hasta las fases proyectuales y de aportaciones como herramienta para proponer estrategias en búsqueda de regenerar ecosistemas acuáticos con procesos de biorremediación con sistemas vivos como el micelio.

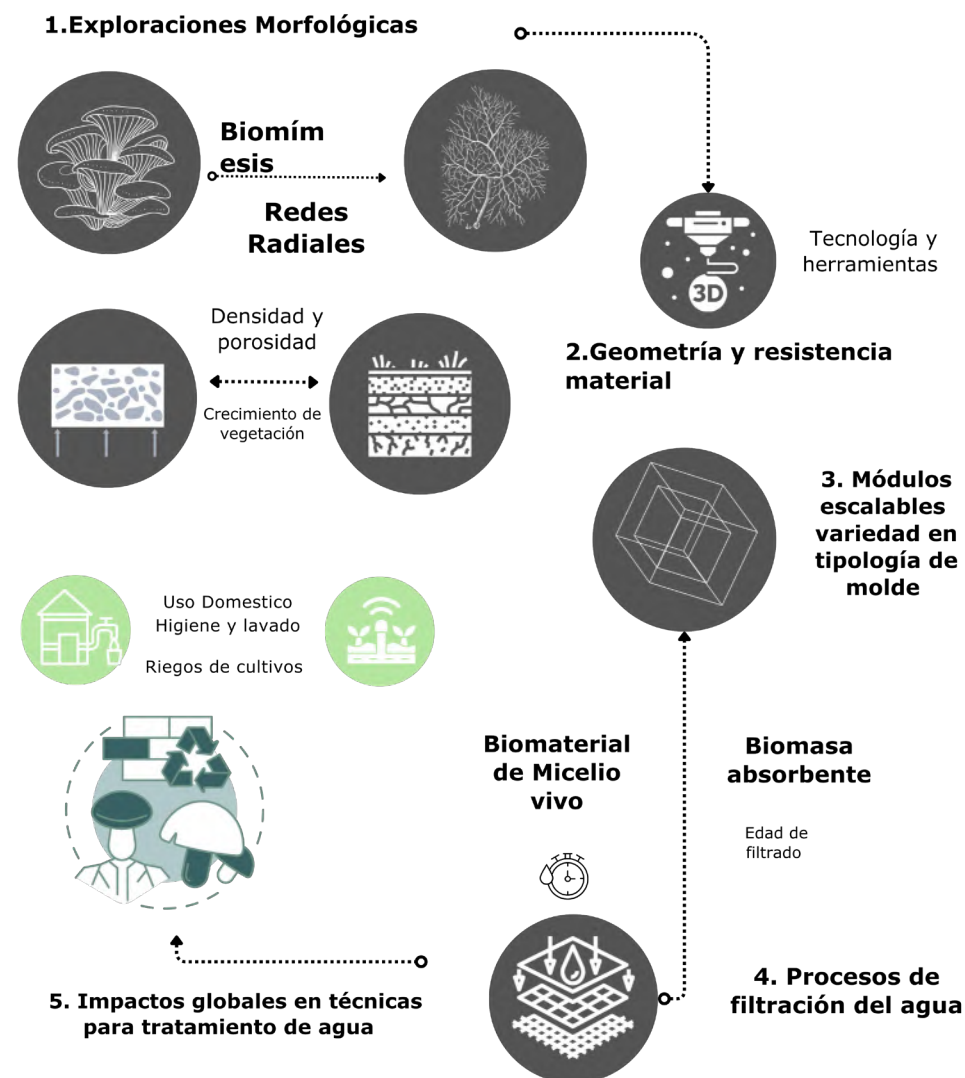
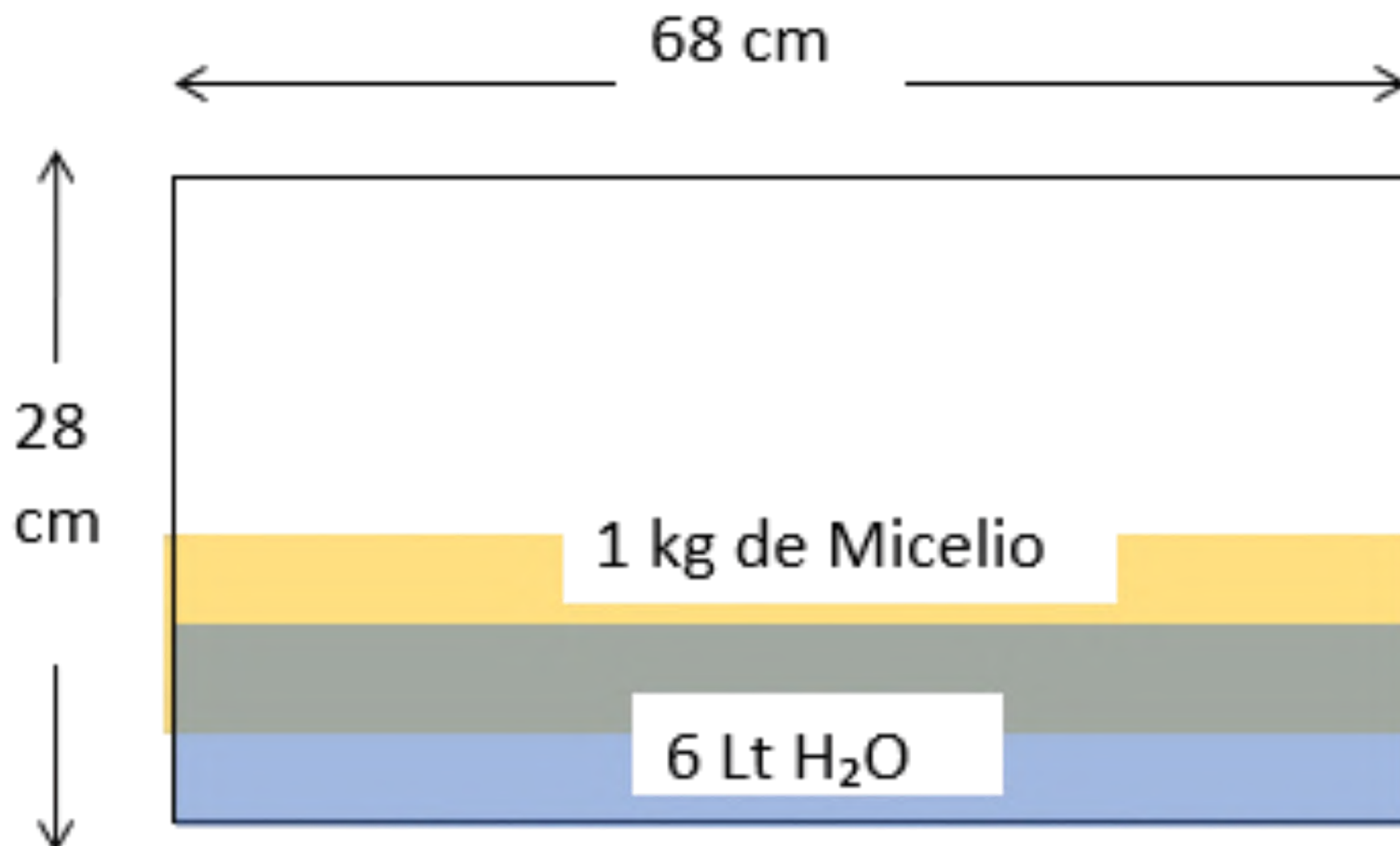


Figura 42. Esquema Diseño o del Biomaterial aportes e impactos.
Fuente: (Vandelook, 2021)



Micelio en fibra de **Trigo, Avena y Coco**

Figura 43. Diseño de Microcosmos de cada escenario de filtrado. Fuente: Autoria propia

ITSi

Procesos de filtrado

Fase III. Construcción de microcosmos para el filtrado del agua con presencia de contaminantes como Nitrógeno, Fósforo, Potasio con micelio de *Pleurotus Ostreatus*.

Esta fase contiene el Diseño y la construcción del microcosmos, donde se simulaban las condiciones de contaminación del agua contaminantes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) y se dispusieron en un sistema de filtrado generado a partir de cambios en el sustrato (Trigo, Avena y Coco) del micelio de *Pleurotus Ostreatus* para evaluar su eficiencia como sistemas de tratamiento (Lechner, 2018).

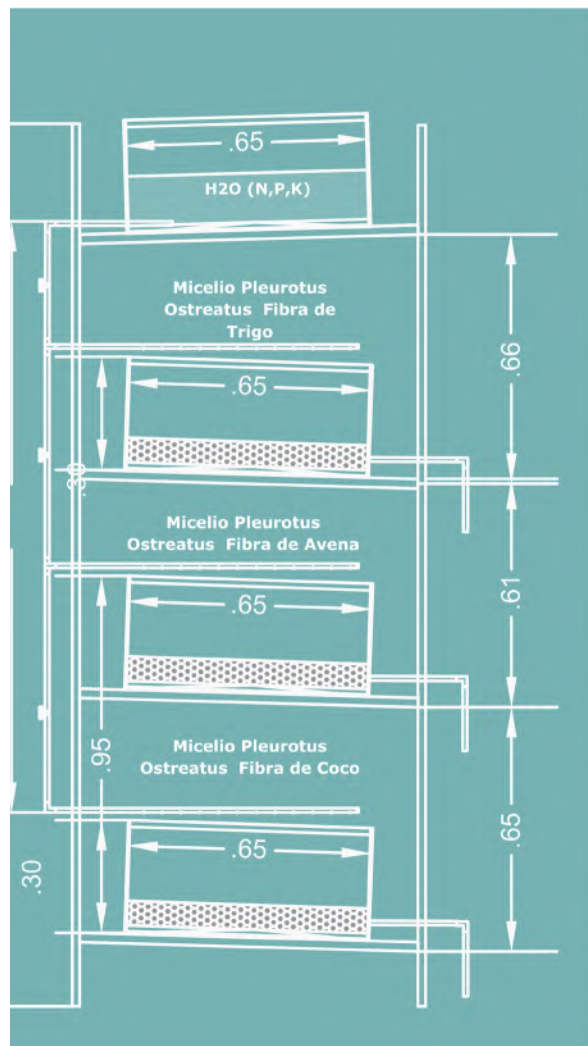
Diseño del agua y proceso de filtrado

El desarrollo del Filtrado del H_2O se llevó a cabo en laboratorio de Ecológica acuática del Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales INIREMA, en el cual se realizaron los procesos de diseño y la construcción de un sistema que permita control de las condiciones de diversas experimentaciones con sistemas vivos de hongos para el filtrado del agua. Se realizó el diseño del microcosmos con características controladas que permitieron observar con precisión el comportamiento del micelio y su interacción con el agua contaminada, este parámetro se realizó bajo el diseño de agua en donde se simula las condiciones que

deben de contener este líquido con presencia de Nitrógeno, Fósforo y Potasio (N, P, K). En la figura 43, se observa la mezcla de material contaminante al agua, los cuales se agregaron mediante un porcentaje de 1% de abono triple 17, por cada litro de agua de garrafón E- pura. Para ello, los escenarios implementados deben simular los parámetros naturales en los que el micelio podría desempeñar su función como medio de filtrado para evaluar el porcentaje de reducción de los materiales contaminantes presentes.

Para ello, los microcosmos deben simular los parámetros naturales en los que el micelio podría desempeñar su función como medio de filtrado. El primer paso de este diseño experimental con el agua consiste en establecer un estudio preliminar del ciclo de vida del micelio utilizando agua directa, para obtener datos base sobre su crecimiento, reproducción y capacidad de adaptación en condiciones específicas, como la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes. En este proceso, se utiliza agua diseñada con materiales específicos para simular condiciones reales y medir cómo el micelio responde a diferentes tipos de contaminantes, como (N, F, K) nutrientes en exceso. Este enfoque permitirá evaluar la viabilidad de los hongos como una solución eficiente para el tratamiento de aguas en condiciones controladas (González, 2008).

Una vez establecidos estos parámetros base, se diseñan experimentos adicionales donde se manipulan variables como el tipo de sustrato y el flujo del agua, con el fin de observar cómo estos factores afectan la eficiencia del micelio en el proceso de filtrado y remoción de contaminantes. Los diferentes sustratos orgánicos, como residuos de plantas



Bolsas de 1 kg de micelio *Pleurotus Ostreatus* en sustrato de trigo, Avena, Coco mas de 30 días



Día 1, Microcosmos piloto base 500g de micelio x 3 litros de H2O

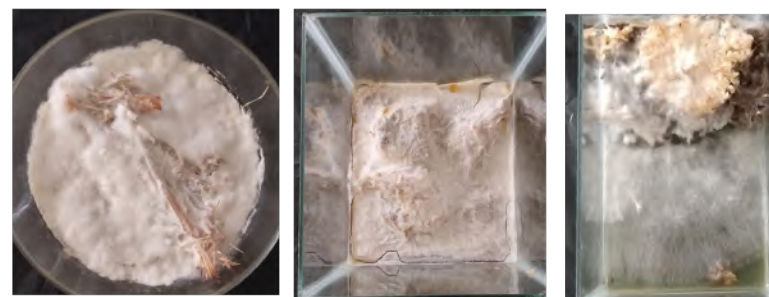


Figura 44. Metodología Fase III Esquema diseño experimental, filtrado y validación de técnicas

o madera, para evaluar su influencia en el crecimiento del micelio y en la capacidad de este para absorber o degradar contaminantes presentes en el agua. Además, es esencial realizar un análisis detallado de los parámetros clave de calidad del agua, tales como nitrógeno, fósforo y potasio, antes y después del paso por los sistemas de filtrado con micelio. Estos nutrientes son fundamentales para comprender la eficacia del micelio en la remoción de contaminantes, ya que su concentración en el agua es un indicador clave de su calidad y puede reflejar la capacidad del sistema para eliminar sustancias indeseables (Arias, 2008).

Diseño y construcción de los microcosmos

Para este ciclo del filtrado, se realiza la construcción del microcosmo definido como el conjunto de implementos y sistema que permite el proceso del tratamiento del agua (Arias, 2008), en donde se definieron la cantidad de variaciones de los escenarios del filtrado en donde se realiza diversas modificaciones en el diseño de la estructura, con dimensiones y pendientes necesarias para garantizar presión para el flujo del agua, en la figura 44, se muestra la construcción del sistema de distribución de agua, con tubería de 1/2" en donde se utilizaron 4 metros lineales y accesorios de uniones como té, codos y 3 válvulas de control de flujo de agua para cada microcosmos y se controló las aberturas con cintas aislantes de los recipientes de plásticos como materas, se construyeron 2 microcosmos con un total de 6 escenarios diferentes para estudiar el cambio de nutrientes en el agua.

Para cada microcosmo se utilizaron 20 litros de agua con

un porcentaje del 1% de nutrientes (N, P, K) para llenar en cada escenario se utilizaron con 6 litros de agua buscando que sea de forma controlada en cada maceta el tiempo que se demora fue de 15 minutos de y el flujo fue del 30% de abertura de la válvula de paso. Se almacenaron 2 litros de agua base para realizar pruebas base de contraste antes de ser puesto en contacto con el micelio *Pleurotus Ostreatus* en el filtrado.

Para accionar cada llenado del escenario se realiza de forma manual, realizando puntos de cierres en zonas de salidas de agua, se inicia con el escenario 1 para lograr que la presión del agua pueda llegar a cada etapa del filtrado, una vez pasado el proceso de flujo del agua se desinfecta cada maceta se dispone en la parte inferior una malla de plástico, para evitar que las partículas grandes del micelio se tomen en las muestras de agua, para cada maceta se agrega 1 kilogramo de material de micelio en los diferentes sustratos Trigo, Avena, Coco en los cuales se dispone 6 litros de H₂O con nutriente (N, P, K), se busca tomar diferentes edades para la toma de muestras para realizar las comparaciones de hallazgos obtenidos en las variaciones de los diferentes experimentaciones.

Cada muestra se etiqueta con diferente color (Trigo-Negro, Avena-Naranja, Coco-Verde), se recolecta en diferentes edades (3 días – 12 días), para realizar la comparación de cada muestra de estudio, se realiza control en diferentes días de las semanas, registrando parámetros de estudio como el Ph, temperatura, Alcalinidad (Calcio, magnesio), Cloruro (indicador de la sal) ppm, La gravedad específica (SG) ORP potencial de oxidación-reducción (Mv), Conductividad (µS/

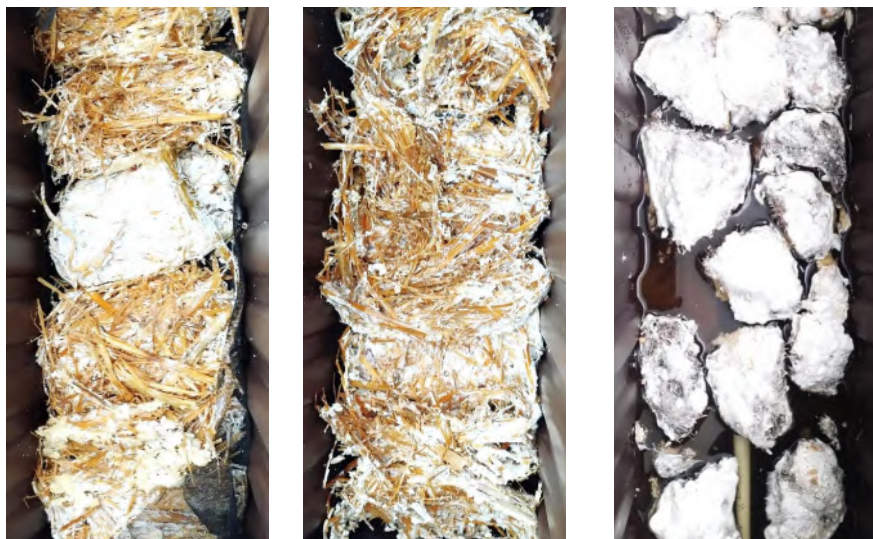


Figura 45. Evolución de escenarios de Filtrado del agua, diferentes edades y volúmenes de análisis en el microcosmos, edad a 1 día y a 30 días de filtrado. Fuente: Registro fotográfico, Zapata 2025

cm). En la figura 45, se muestra cada escenario de estudio contiene agua con micelio de *Pleurotus Ostreatus* crecidos en diferentes sustratos agroindustriales, trigo, avena y coco, con una edad de 60 días de proliferación de la sepa de Micelio. Se realiza pruebas de conductividad en periodo de tiempo a tomas de aguas para tener una variable de soporte de análisis de las revisiones de los escenarios filtrados, ver la figura 46 en donde se muestra los valores analizados y las variables de estudio en diferentes periodos del tiempo, se anexa al documento las bitácoras de revisión del filtrado de agua y las variables de estudio en el microcosmo.

Para la toma de muestras de H_2O se tienen en consideración la normativa mexicana vigente (Toma de Muestras bajo



Figura 46. Registro fotográfico del Microcosmo para la filtración del agua con Micelio *Pleurotus* con fibra de trigo, avena y coco

NMX-AA-003-1980) en donde se establecen los procesos de filtrado del agua diseñada con procesos de validación, para esto hay que tener en cuenta parámetros de toma de muestras, almacenamiento y transporte del agua tomadas para realizar diferentes estudios y aplicar técnicas que nos permitan validar reducción de materiales contaminantes en el agua, en la norma se establece el tipo de recipiente para utilizar en nuestro caso de estudio son de vidrio y tapa metálica, debe estar previamente esterilizado para no contaminar la muestra tomada, se debe llenar $\frac{3}{4}$ partes de recipiente para garantizar el oxígeno, son trasladadas en condiciones de refrigeración en frío de 5° - 10° C rango que permite control el estado del agua al momento de ser tomado cada de H_2O .

ITSi

Procesos de Validación de condiciones del agua

Fase IV. Validación del Filtrado del agua, con técnicas de Impedancia y UV-vis

Se implementó una metodología experimental enfocada en determinar la eficiencia de biofiltros elaborados con micelio para el tratamiento de aguas contaminadas. Esta fase tiene como objetivo principal evaluar la capacidad del sistema para reducir la concentración de contaminantes solubles, particularmente nutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Inicialmente se realizó el análisis de los cambios de la resistencia eléctrica del agua antes y después del proceso de filtración por medio de la técnica de Impedancia Electroquímica en la figura 47 se muestra la celda de medición empleada, obteniendo así escenarios iniciales que validaron la reducción de iones en el agua, se llevo a cabo un proceso de comparación con las pruebas específicas de nutrientes presentes en el agua por medio de técnicas de UV-visible con pruebas espectrofotométricas en la figura 48 se muestra el equipo de medición, en donde se obtuvieron valores que determinan los porcentajes de reducción de materiales contaminantes presentes en el agua.



Figura 47. Pruebas de resistencia de Impedancia Electroquímica



Figura 48. Pruebas de condiciones de agua, Espectroscopia UV-visible

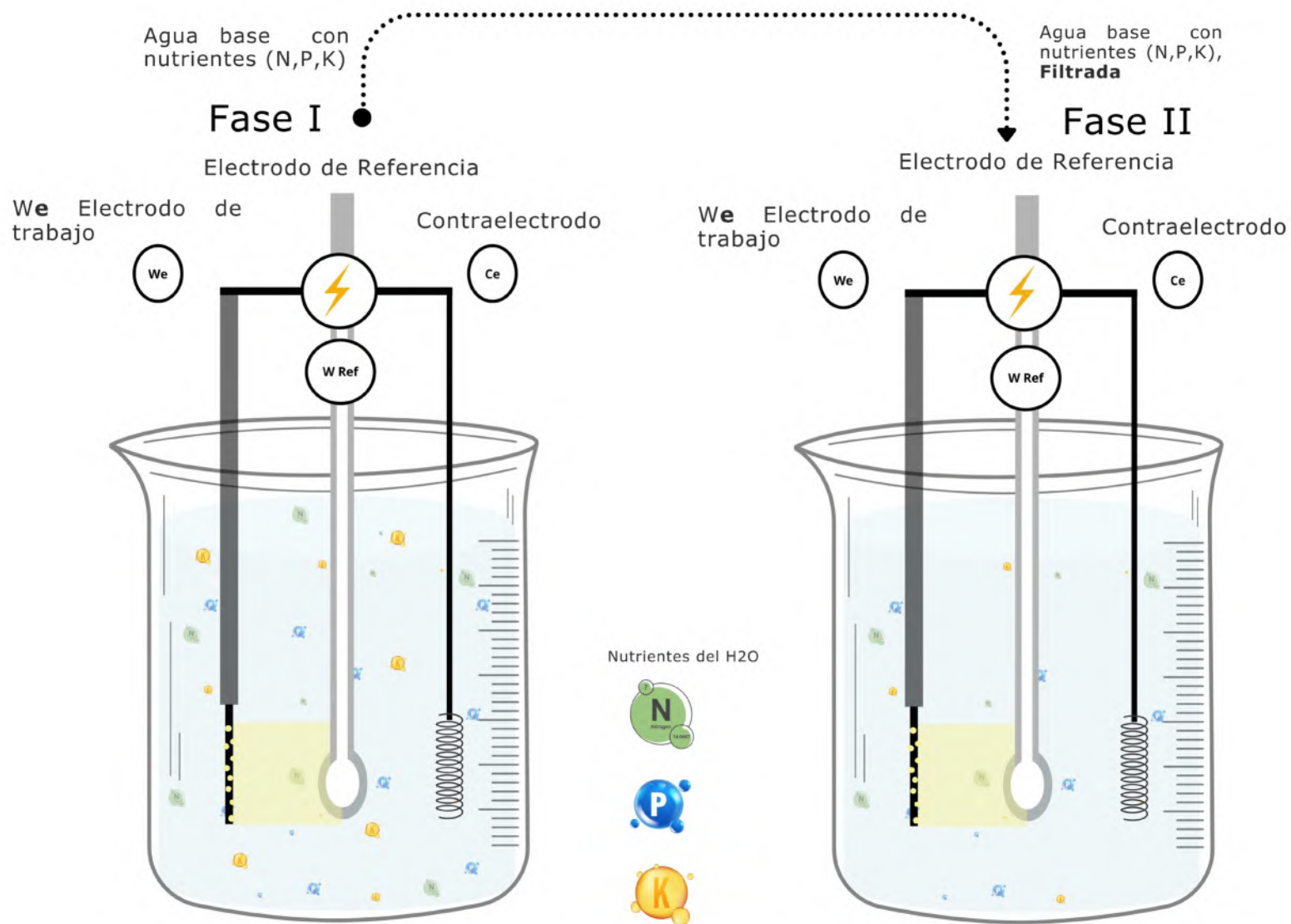


Figura 49. Metodología Fase IV Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) grafico celdas electroquímicas

ITSi

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Mediciones de EIS en Agua antes y después de filtrada.

Las pruebas de impedancia electroquímica se realizaron en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), ubicado en Querétaro, México. El Para ello, las muestras de agua filtrada se colectan en recipientes herméticos que garantizan la integridad de sus propiedades fisicoquímicas durante el transporte desde la ciudad de Morelia (190 km de distancia) se garantiza su refrigeración durante almacenamiento. .

En la figura 49, muestra cómo se disponen las celdas electroquímicas para Las mediciones se realizaron en configuración de tres electrodos (3E) utilizando una estación para electroquímica Biologic VSP, la cual se configuró en modo potencioestático para generar la perturbación al sistema en función del potencial fijado en las pruebas. Se efectuaron tres mediciones por potencial, inicialmente a

10 mV (7.07 mV RMS), posteriormente a 30 mV (21.21 mV RMS) y finalmente a 50 mV (35.36 mV RMS), con el fin de observar la conservación del estado estacionario en este rango de potenciales, tal como se evidenció en los voltamperogramas realizados previamente. El equipo se configuró para ejecutar un barrido de frecuencias comprendido entre 10 kHz y 0.1 Hz, con una captación de 8 puntos por década en cada medición. Cada prueba tuvo una duración aproximada de 3 minutos, seguida de un tiempo de reposo de 5 minutos antes de iniciar la siguiente medición, para un total de 8 minutos entre mediciones. La inspección de los espectros de impedancia obtenidos antes y después de la filtración del agua permitió identificar tanto contribuciones resistivas propias del sistema como contribuciones capacitivas, visibles en la distribución de los puntos experimentales en los espectros, que sugieren la presencia de una contribución asociada a la transferencia de carga a muy bajas frecuencias.

Para estas mediciones se establecieron dos escenarios de filtrado. Un filtrado inicial de 5 días y un filtrado secundario de 12 días para cada uno de los sustratos (Trigo, Avena y coco). Se incluyo ademas un escenario de comparación que se denomino blanco, para una muestra de agua diseñada sin filtrar. Los datos obtenidos fueron graficados en diagramas de Nyquist, Bode Modulo y Bode Fase, permitiendo observar los cambios en la resistencia del agua para cada escenario.

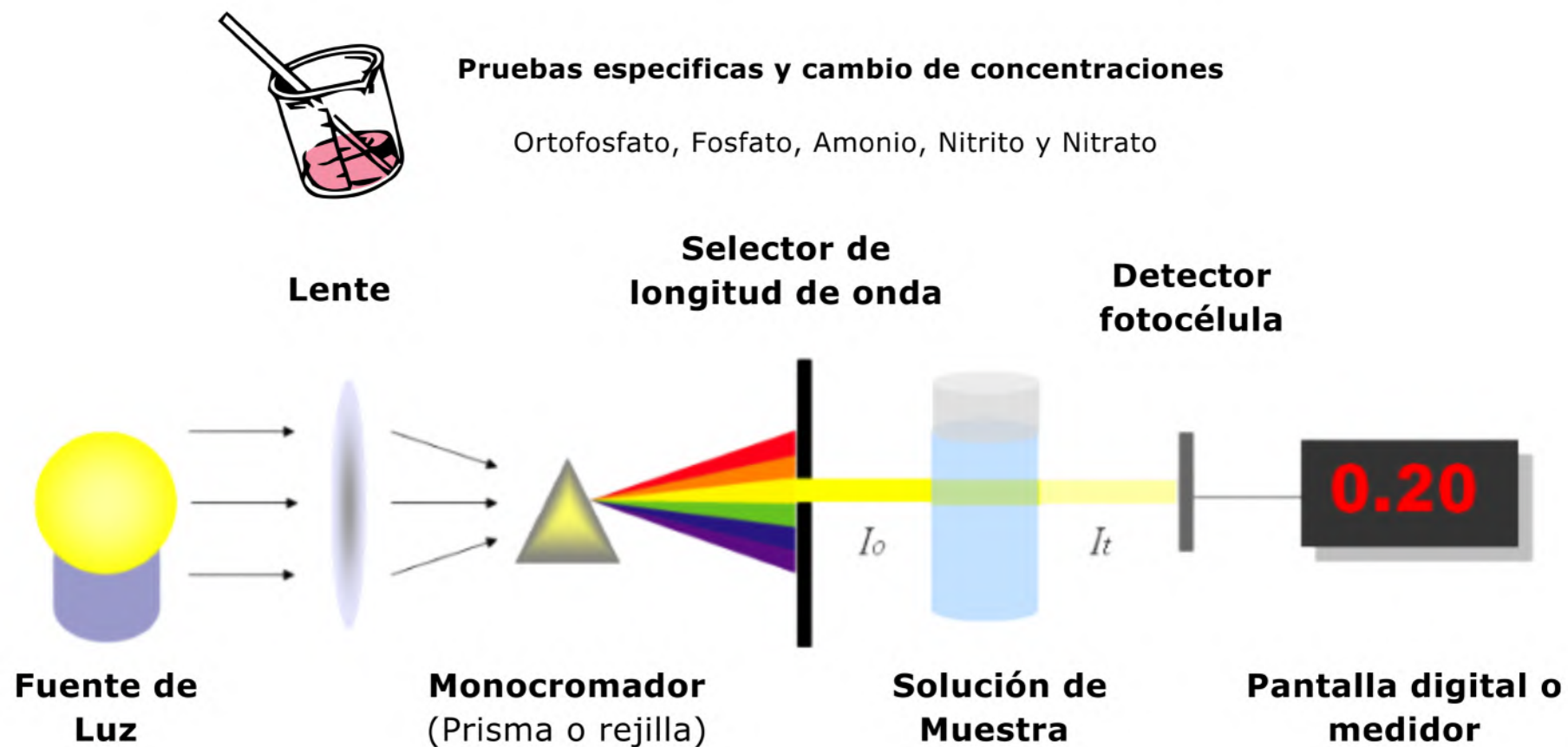


Figura 50. Metodología Fase IV Pruebas espectrofotometricas UV-Vis

ITSi

Espectroscopía fotométrica

Las Técnicas de contraste de filtrado del agua por métodos como Espectroscopía Fotométrica UV-vis

La metodología empleada en la investigación nos permite el establecimiento de una base de comparación robusta entre los métodos tradicionales de análisis de calidad del agua y los efectos inducidos por los biofiltros miceliales. Para validar los resultados, se utilizarán dos metodologías complementarias: el análisis fisicoquímico convencional y la espectroscopía fotométrica UV-VIS, fueron desarrolladas en el Laboratorio de Ecología Acuática del Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales (INIREMA), el cual cuenta con equipos como espectrofotómetros. Ver la figura 50 la configuración de la celda de medición y kits de reactivos certificados, esenciales para asegurar datos precisos y reproducibles.

Además, se implementará un protocolo experimental para la elaboración de curvas de calibración, las cuales son esenciales para cuantificar con exactitud la concentración de nutrientes disueltos. Estas curvas se construirán a partir de soluciones estándar preparadas con concentraciones conocidas de cada analito (fosfato, nitrato, amonio, etc.), cuyos valores de absorbancia serán graficados para obtener una ecuación de calibración (generalmente lineal). Este procedimiento permitirá interpolar los valores

de las muestras tratadas y así conocer con precisión su composición química, ver en la figura 51 el cuadro de porcentajes y concentraciones de cada muestra específica

En el caso del fósforo total y ortofosfato, se empleará el método colorimétrico del ácido ascórbico, en el cual se forma un complejo azul de fosfomolibdato que se mide a 690 nm. Para el nitrato (NO_3O) y nitrógeno total, se usará el método de Griess, basado en la reducción del nitrato a nitrito y posterior reacción con sulfanilamida, midiendo a 543 nm. El amonio (NH_4O) será evaluado mediante el método de Nessler o el método de salicilato, que producen un color amarillo o verde, medido entre 420 y 655 nm, dependiendo del protocolo utilizado. La precisión de estos métodos estará asegurada mediante la evaluación constante de parámetros estadísticos como el coeficiente de correlación (R^2), la pendiente de la curva, los límites de detección y el rango de linealidad útil, los cuales serán documentados en cada serie analítica. De esta forma, se garantiza la trazabilidad de los datos y la validez científica de los resultados obtenidos en las pruebas de eficiencia de los biofiltros miceliales.

Preparación e instrumentalización de las pruebas de espectroscopía fotométrica UV-VIS:

Pruebas para caracterizar materiales contaminantes del agua filtrada en donde se busca la identificación de fósforo total, ortofosfato, nitrato, nitrito y amonio. Las determinaciones espectrofotométricas se realizarán utilizando un espectrofotómetro, modelo HACH DR6000 o Thermo Scientific Evolution, capaz de operar en un rango espectral de 190 a 1100 nm y equipado con celdas de 10 mm



Figura 52. Solución estándar curva de calibración fósforo total

Parámetro	Método	Longitud de onda (nm)	Rango típico de concentración (mg/L)
Fósforo total	Ácido ascórbico + digestión previa	640 nm	0.1–5.0
Ortofosfato	Acido ascórbico sin digestión	640 nm	0.05–3.0
Nitrato (NO ₃ ⁻)	Reducción cadmio + Griess	543 nm	0.1–10.0
Nitrito (NO ₂ ⁻)	Reacción con sulfanilamida	543 nm	0.01–2.0
Amonio (NH ₄ ⁺)	Salicilato o Nessler	655 nm (Nessler) / 420 nm (salicilato)	0.05–5.0

Figura 51. Tabla de métodos y concentraciones de reactivos



Figura 53. Solución estándar curva de calibración Nitrito

de paso óptico. Para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados, se emplearán reactivos certificados de grado analítico (HACH, Merck o Sigma-Aldrich), así como equipamiento complementario que incluye bloques de digestión térmica con control de temperatura (120–150 °C), balanza analítica con una precisión de ± 0.1 mg, micropipetas de volumen variable (10–1000 μL), cristalería de borosilicato, baño maría o autoclave para procesos térmicos, y agua ultrapura tipo I para la preparación de soluciones y estándares.

La operación del espectrofotómetro incluirá rutinas de calibración diaria, verificación del funcionamiento de las lámparas, y validación de lecturas mediante estándares certificados, conforme a los lineamientos establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

La preparación de curvas de calibración para cada analito (nitrato, amonio y fosfato)(ver figuras 52 y 53) se realizará siguiendo los lineamientos establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). En primer lugar, se elaborarán soluciones estándar madre a una concentración de 1000 mg/L, a partir de sales analíticas de alta pureza, asegurando su trazabilidad y estabilidad. A partir de estas soluciones madre, se efectuarán diluciones seriadas para obtener concentraciones dentro del rango analítico de interés (0.1–5.0 mg/L), adecuadas para la cuantificación espectrofotométrica de nutrientes. Para cada concentración estándar, se aplicará el reactivo específico según el método correspondiente, permitiendo el desarrollo del color característico de la reacción analítica. Las mediciones de absorbancia se

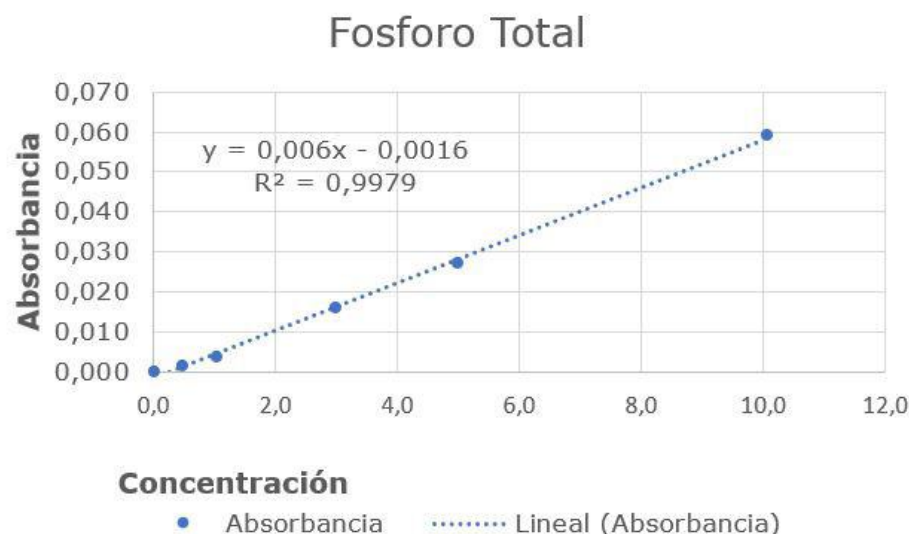


Figura 54. Curva de calibración Fósforo Total

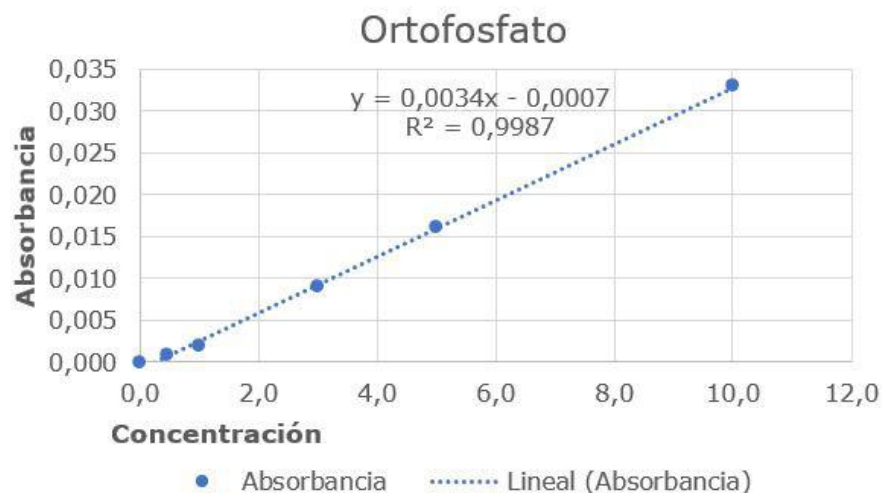


Figura 55. Curva de calibración Ortofosfato

registrarán en la longitud de onda óptima determinada para cada analito. Posteriormente, se construirá la curva de calibración graficando la absorbancia (eje Y) frente a la concentración (eje X), y se determinarán los parámetros estadísticos asociados: pendiente, intercepto, coeficiente de correlación lineal ($R^2 \geq 0.995$), límite de detección (LOD) y límite de cuantificación (LOQ). Cada curva será preparada al inicio de una nueva serie de análisis y validada mediante estándares de control intercalados, con el fin de garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones. Las curvas también servirán como base para la comparación con las absorbancias obtenidas en muestras de agua filtrada tratada con diferentes sustratos miceliales (Trigo, Avena, Coco y Blanco) a lo largo de los días 5, 12, 20 y 30 del periodo experimental.

La preparación de curvas de calibración para la determinación de ortofosfato y fósforo total (ver figuras 54 y 55) mediante espectroscopía fotométrica se basa en el método colorimétrico del ácido ascórbico, donde los fosfatos reaccionan con molibdato de amonio formando un complejo azul medido a 640 nm. Para ortofosfato, las muestras se analizan directamente, mientras que el fósforo total requiere una digestión previa con persulfato y ácido sulfúrico para convertir todo el fósforo en ortofosfato. Las curvas se construyen a partir de soluciones estándar con concentraciones conocidas (0.1–2.5 mg/L), aplicando los reactivos a cada estándar y midiendo su absorbancia, con una correlación mínima ($R^2 \geq 0.995$) para garantizar precisión. La reproducibilidad se valida mediante controles de calidad, análisis en duplicado y verificación de límites de detección, asegurando la trazabilidad y confiabilidad del

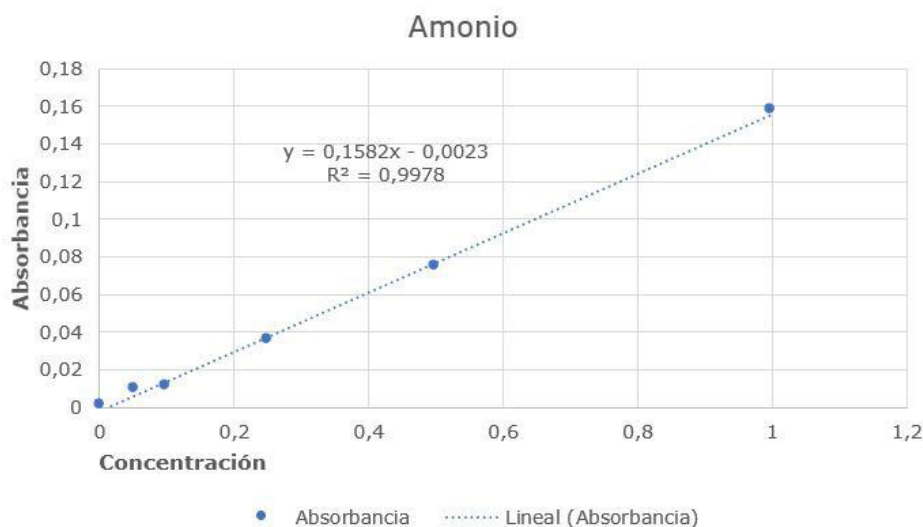


Figura 56. Curva de calibración Amonio

análisis según las directrices del APHA (2017)

La preparación de curvas de calibración para amonio y nitrito (ver figuras 56 y 57) en análisis de calidad de agua se realiza mediante métodos colorimétricos espectrofotométricos que permiten cuantificar con precisión estos compuestos en concentraciones bajas. Para el amonio se emplea el método del salicilato, donde se forma un complejo verde medido a 655 nm, mientras que para nitrito se utiliza el método de Griess, basado en la reacción con sulfanilamida y NED, generando un complejo rosa medido a 543 nm. A partir de soluciones estándar madre (1000 mg/L), se preparan diluciones entre 0.1 y 2.5 mg/L, que se procesan con los reactivos específicos y se grafican para obtener la curva de calibración. La precisión y replicabilidad se garantizan mediante coeficientes de correlación $R^2 \geq 0.995$, límites de detección ≤ 0.05 mg/L, análisis en duplicado, controles de calidad y recuperación entre 90–110%, conforme a los lineamientos del método estándar APHA (2017).

La metodología de análisis iniciará con la comparación directa de los parámetros fisicoquímicos iniciales frente a los registrados luego del proceso de filtración. A partir de estos datos, se calcularán los porcentajes de remoción de cada compuesto, empleando la fórmula:

$$\% \text{ Remoción} = [(C_0 - C_f)/C_0] \times 100$$

Donde C_0 representa la concentración inicial y C_f la concentración final del contaminante. Este cálculo permitirá cuantificar la capacidad de retención o transformación del micelio frente a nutrientes disueltos y metales ligeros presentes en el agua.

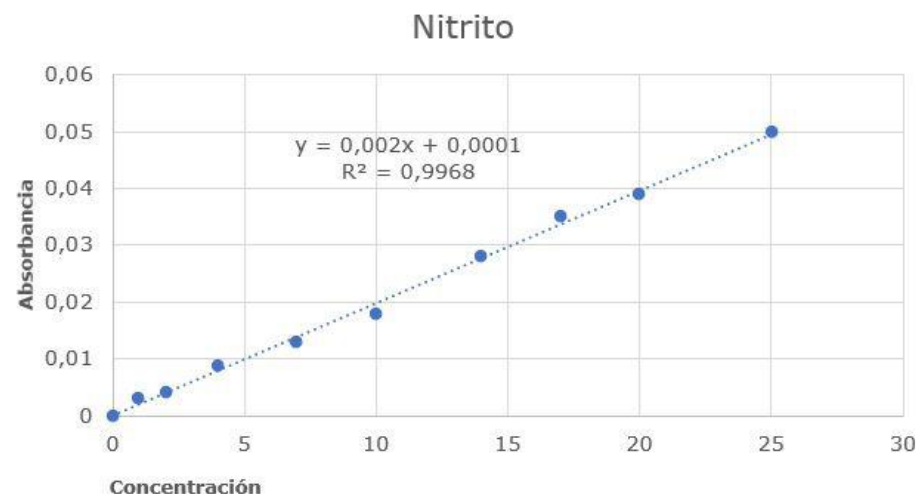


Figura 57. Curva de calibración Nitrito



Resultados

Hallazgos y aproximación

Viabilidad y degradación de Contaminantes

Biofiltro Micelio

Filtrado de agua



El **Capítulo 4**, titulado “**Viabilidad y degradación de Contaminantes**” se presentan los resultados y aplicaciones de la investigación en diversas escalas del biomaterial de micelio, abordando tanto el ámbito experimental con validación científica con pruebas en el agua y porcentajes de reducción de contaminantes, se integra también el desarrollo proyectual con el objetivo de implementar estrategias en el futuro regenerativas para el saneamiento y tratamiento de aguas con exceso de contaminantes.

Pruebas de Validación

Futuros Probables





Figura 58. Agares y semillas inoculadas, variedad de especies de hongos



Figura 59. Semilla de trigo con especies de hongos locales

ITSi

Resultados FASE I Biomaterial y cultivo

Fase I: Experimentación Desarrollo del Biomaterial: Cultivo y Caracterización del Micelio

Caracterización de especies de hongos + grano

Las cinco especies de hongos seleccionadas para el estudio fueron transportadas de Uruapan a Morelia bajo condiciones estrictas de seguridad para minimizar el riesgo de contaminación como estar almacenadas en un espacio independiente, con control de la humedad, la luz y la temperatura, cada revisión se debía garantizar el equipo de protección para no contaminar las sepas. Cada especie fue etiquetada con precisión y colocada en envases estériles durante el transporte. Este procedimiento aseguró la integridad de las muestras y facilitó su correcta disposición en los espacios de incubación del laboratorio. Véase Figura 58

La Figura 59 muestra que los granos de trigo, lenteja y

alpiste inoculados con las especies seleccionadas exhibieron variaciones en la tasa de crecimiento y colonización. *Lentinula edodes* y *Pleurotus* spp. evidenciaron una rápida colonización y proliferación, lo que sugiere una alta adaptabilidad al sustrato de trigo. En contraste, *Ganoderma* spp. presentó un crecimiento más lento pero constante, indicando una capacidad de colonización más prolongada. *Boryana cheran*, a pesar de su carácter local, mostró un crecimiento eficiente, lo que sugiere su posible adaptabilidad a condiciones específicas del entorno. *Zirahuen*, siendo también una especie local, demostró un buen desempeño en términos de crecimiento, lo que podría reflejar una relación sinérgica con el sustrato de trigo.

La incubación de grano de trigo con las especies de hongos evaluadas, presentada en la Figura 46, reveló que tanto las especies locales como las no locales tienen potencial para aplicaciones en biorremediación y producción de micelio. La rápida colonización observada en *Lentinula edodes* y *Pleurotus* spp. indica su idoneidad para aplicaciones prácticas, mientras que el crecimiento más lento de *Ganoderma* spp. puede ser adecuado para aplicaciones que requieren un proceso más prolongado.

Para la definición de los sustratos a utilizar, se establecieron variables de selección basadas en la proliferación de las especies de hongos evaluadas. Se observó que los sustratos adecuados deben compartir características con los hábitats originarios de los hongos, los cuales presentan un alto contenido de celulosa vegetal. Los hongos desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas terrestres al sintetizar y descomponer la materia orgánica. En este



Figura 60. Proliferación de la sepa en 8 días de incubación



Figura 61. Nutrientes al sustrato natural

ITSi

Resultados

FASE I

estudio, se recolectaron diversos sustratos que incluyen fibras vegetales (como hojas de palma, hojarasca de árboles y flores secas), fibras orgánicas (como cáscaras de papa y piña), y fibras sintéticas (como celulosa de cartón y papel). Los nutrientes adicionados a los sustratos consistieron en cal, borra de café y agua, en proporciones controladas



Figura 62. Sembrado de micelio en variedad de sustrato como: papel, fibra coco, trigo, flor de jacarandá y cartón

para los cinco sustratos seleccionados. Posteriormente, se procedió a la esterilización e incubación de los hongos. A continuación, se presenta en la Figura 61 un ejemplo con sustrato de palma, cal y agua como mezcla inicial.

En la Figura 62 se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas durante el semestre 2024-1, entre los meses de marzo y julio. Durante este período, se incubaron diversos sustratos seleccionados para evaluar su efectividad en la proliferación de las especies de hongos estudiadas. Los sustratos incluidos en el estudio abarcaron fibras vegetales como hojas de palma, hojarasca de árboles y flores secas; fibras orgánicas como cáscaras de papa y piña; y fibras sintéticas como celulosa de cartón y papel. El objetivo de estas pruebas fue identificar las combinaciones más efectivas de especies de hongos y sustratos, así como determinar las condiciones óptimas para su crecimiento y rendimiento en las pruebas experimentales. Los datos obtenidos permitieron establecer las características ideales de los sustratos para las aplicaciones previstas en el estudio.

Tras 15 días de inoculación, los sustratos muestran colonización por el hongo. Los resultados obtenidos varían según las características del sustrato. Los sustratos que demostraron una mejor respuesta incluyen aquellos con un alto contenido vegetal, como las flores secas, y las cáscaras orgánicas, que proporcionan nutrientes esenciales para el crecimiento de los hongos. Los materiales con un alto porcentaje de celulosa, como el cartón y el papel, también resultaron efectivos. Además, la fibra vegetal de palma, que requiere una constante presencia de humedad, mostró una buena colonización. Estas observaciones se ilustran

en las Figuras 63 y 64. La Figura 65 muestra el sustrato compuesto por cartón, papel y cáscaras de papa con micelio de *Pleurotus* spp., mientras que la Figura 66 presenta el sustrato de hojas de flor de jacaranda y fibra de palma también con micelio de *Pleurotus* spp.

Caracterización de Hábitat experimental, crecimiento del micelio medio de cultivo, grano y sustrato

Para cada especie de hongo se establecieron condiciones específicas de incubación, ajustadas a parámetros críticos como temperatura, humedad y ventilación. Estas condiciones óptimas se determinaron con base en las necesidades biológicas particulares de cada especie, asegurando un entorno favorable para el crecimiento del micelio. ver Figura 67. Las condiciones específicas fueron las siguientes:

- Temperatura: Se mantuvo una temperatura constante en el rango de 22°C a 25°C, ajustada según las exigencias de cada especie.
- Humedad: Se controló el nivel de humedad relativa, manteniéndolo entre el 70% y el 80%, para proporcionar un ambiente adecuado para la proliferación del micelio.
- Ventilación: Se implementaron sistemas de ventilación controlada para prevenir la acumulación de CO₂ y promover un intercambio de aire eficiente.

Después de 15 días de incubación, se identificó contaminación en varias pruebas, lo que indica la necesidad de ajustar los procesos de esterilización y manejo de los granos a inocular.

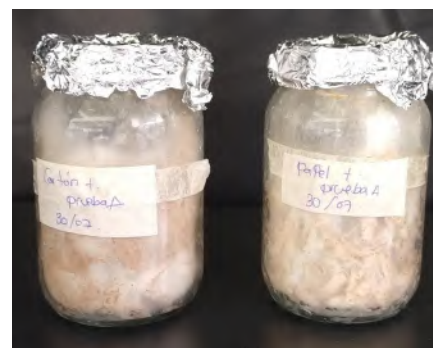


Figura 63.. Evolución del crecimiento del micelio

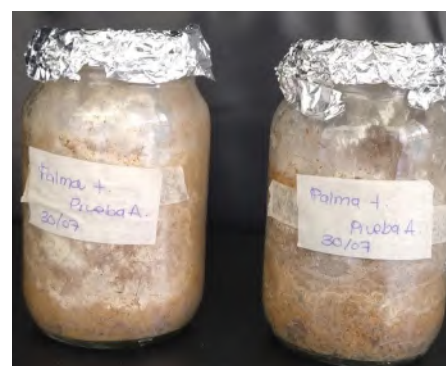


Figura 64. Colonización de cepas miceliales en sustratos



Figura 65. Colonización de cepas miceliales en sustratos naturales

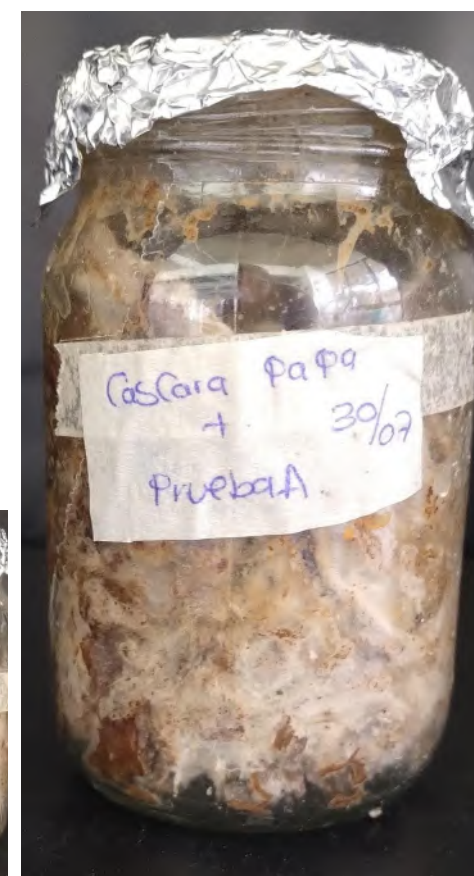


Figura 66. Colonización de cepas miceliales en sustratos naturales



Figura 67. Revisión del cultivo y contaminación



Figura 68. Almacenamiento e incubación

Asimismo, se detectó la presencia de microorganismos no deseados que impidieron el desarrollo del micelio. Es fundamental mejorar las condiciones de almacenamiento para prevenir la contaminación cruzada. En la Figura 67 se muestra de agar contaminado con especies de hongos como Shiitake, Boryana, Zirahuen, Pleurotus y Ganoderma.

Para la correcta gestión de las pruebas contaminadas, es necesario utilizar recipientes distintos a los destinados para la materia orgánica. La aparición de hongos de colores verde, negro y violeta sugiere la proliferación de microorganismos no deseados en los medios de cultivo. Se debe lavar y desinfectar todos los recipientes e instrumentos de trabajo. Asimismo, será necesario reiniciar el proceso de esterilización del grano y del medio de cultivo para asegurar un ambiente adecuado para el desarrollo del micelio de interés, Ver la figura 68 en donde se almacenaron y controlaron muestras iniciales.

Exploraciones iniciales placas base forma y diseño:

Con el sustrato colonizado por el micelio, se implementaron diversos moldes para generar prototipos del crecimiento del sustrato. Se identificaron varios hallazgos y métodos que requieren mejoras para desarrollar el biomaterial deseado. En las pruebas iniciales, como se muestra en la Figura 69, se observó la necesidad de regular la proporción de sustrato en relación con el grano que contiene el micelio. Es esencial asegurar que toda la pieza esté completamente cubierta por el hongo. El sustrato inicial, que contenía un mayor porcentaje de polvo en comparación con la fibra, mostró la

necesidad de añadir un mayor porcentaje de fibras gruesas para prevenir el desmoronamiento de la pieza. El material del molde, como se detalla en la Figura 70, facilitó un mejor control durante el proceso de crecimiento del micelio.

El molde utilizado para experimentar con el biomaterial fue de silicona, como se muestra en la Figura 71. Este tipo de molde permitió un crecimiento controlado del hongo, generando una capa superior de micelio que intentaba expandirse. Para futuros moldes, es necesario que sean herméticos pero que también permitan un control visual del crecimiento del hongo. Además, se debe ajustar la proporción de grano en relación con el sustrato para asegurar que el micelio se adapte completamente a la forma del molde. Algunas de las muestras presentaron una resistencia inadecuada, lo que sugiere la necesidad de optimizar las proporciones en cada etapa del desarrollo del micelio. Es fundamental mantener un ambiente controlado para evitar la contaminación por microorganismos presentes en el entorno. Esto incluye el control de la temperatura, la humedad y la iluminación durante la incubación del micelio.

Finalmente, los resultados obtenidos servirán como base para optimizar variables del sistema, como tiempo de contacto, densidad del micelio y tasa de flujo, permitiendo avanzar hacia el diseño de biofiltros regenerativos escalables, replicables y sostenibles (Light, 2018; Brown, 2008). Esta fase contribuye al conocimiento aplicado en soluciones de biorremediación y tratamiento descentralizado de aguas, alineadas con los principios de la ecología industrial y las tecnologías de diseño regenerativo.



Figura 69. Moldes acrílicos placas de 1 cm



Figura 70. Moldes acrílicos placas de 1 cm



Figura 71. Vaso de silicona y micelio



Figura 72. Especímenes Pleurotus Ostreatus-Gris en fibra de coco

ITSi

Resultados

FASE I

Evolución del cultivo, Micelio de *Pleurotus Ostreatus* con variaciones en sustrato de fibra

Matriz de evolución del micelio sepas *Pleurotus Ostreatus* Gris y Blanca.

Se utilizó la especie *Pleurotus Ostreatus*, conocida por su capacidad adaptativa y crecimiento rápido en medios lignocelulósicos. Para evaluar su desempeño, se emplearon tres tipos de sustrato: trigo, avena y fibra de coco, todos en mezclas que contenían un 75% de micelio activo en relación con el volumen total del sustrato. Este porcentaje permitió una colonización eficiente y homogénea en un periodo reducido, evidenciando así el potencial del hongo para desarrollarse en una amplia variedad de matrices orgánicas.

Se realizó una matriz de evaluación del crecimiento del micelio en diferentes sustratos Trigo, Avena, Coco y la cantidad de la proporción del molde según el peso total de la muestra, se encontraron resultados en el crecimiento y proliferación luego del periodo de incubación inicial en diferentes muestras del biomaterial, se establecieron y controlaron los parámetros de humedad interna en la fibra, la temperatura del ambiente de un rango de 22°C a 27°C y el cuarto de incubación oscuro de 600 a 1200 Lux, Ver en la figura 72 las revisiones de las muestras en diferentes edades, observando la proliferación del micelio.

Se obtuvieron diferentes especímenes de micelio, en diferentes escalas y proporciones de semilla de *Pleurotus Ostreatus*, eso en búsqueda de la relación de la expansión en tiempo y sustratos, se realizaron las siembras de las especies de hongos y las variantes de sustrato de fibra natural. La implementación de diferentes moldes de plásticos translúcidos permitió la revisión de la evolución del micelio, evidenciando las diferentes respuestas y desarrollo del micelio a continuación se describe los resultados obtenidos hasta la fecha del material de estudio.

Micelio *Pleurotus* Gris y Blanco, con Sustrato de Fibra de Trigo, En la figura 73, se observa un grupo de muestras, tienen parte de la colonización en desarrollo se observa puntos específicos de la fibra colonizados, para la proliferación del hongo en una bolsa de 2 kilogramos se demoró 30 días para la obtención del Micelio, el desarrollo según el porcentaje de 25% de semilla evidencia mejor desempeño en la producción del material.



Figura 73. Diseño experimental herramientas área de trabajo, especímenes, placas, cubos y bolsa y zona de incubación oscura
Fuente: registro fotográfico Autoría propia

Micelio Pleurotus Gris y Blanco, con Sustrato de Fibra de Avena, Ver en la figura 73, estas variantes han presentado un desarrollo del micelio un poco más despacio, lo que data de una respuesta diferente al medio de cultivo, se reportan hallazgos interesantes en las muestras con 25% de semilla de micelio.

Micelio Pleurotus Gris y Blanco, con Sustrato de Fibra de Coco, En la figura 66 estas muestras presentan características óptimas y favorables de colonización del sustrato en las dos variantes de semilla 25% y 15%, el crecimiento se ha dado de forma rápida y resistente, la bolsa de 2 kilogramos de fibra completo su producción de Micelio en 15 días lo que responde a rapidez y fuerza de producción.

Durante la fase experimental, se diseñaron y elaboraron muestras de material con el fin de analizar el comportamiento del micelio en distintos entornos físicos y bajo diferentes presentaciones. Entre los formatos utilizados se incluyeron cubos sólidos de 4cm x 4cm, placas Petri de 8 cm, y bolsas de cultivo de dos kilogramos. Esta diversidad permitió observar la dinámica de expansión y colonización del micelio en volúmenes y formas variables.

En la figura 74 se documentan los moldes plásticos utilizados para contener las muestras de biomaterial. Estos moldes sirvieron para mantener la forma del material durante la colonización y facilitar la evaluación estructural del micelio en distintos contextos de aplicación.

Las condiciones de incubación fueron cuidadosamente controladas durante los meses de mayor temperatura del verano de 2025. Ver en la figura 75, el registro de las condiciones ambientales en donde se mantuvo una temperatura estable entre 20°C y 30°C, un rango ideal para favorecer el crecimiento sostenido del micelio. Además, se ajustaron las escalas de cultivo para optimizar la producción doméstica continua, alcanzando una ventana de cosecha estable de aproximadamente 90 días. Este período de producción constante permitió generar el volumen necesario de biomaterial requerido para las fases posteriores del proyecto.

Cabe destacar que el objetivo final de esta etapa fue producir el material necesario para realizar pruebas de diseño experimental orientadas al desarrollo de sistemas de filtrado de agua. En este sentido, se buscó no solo la colonización completa del sustrato, sino también la formación de un cuerpo micelial denso, cohesionado y resistente, capaz de soportar condiciones ambientales extremas como las provocadas por inundaciones. Esto es especialmente importante dado que el material debe mantener su integridad estructural y funcional en entornos con alta humedad, cambios térmicos y presión hidráulica variable.

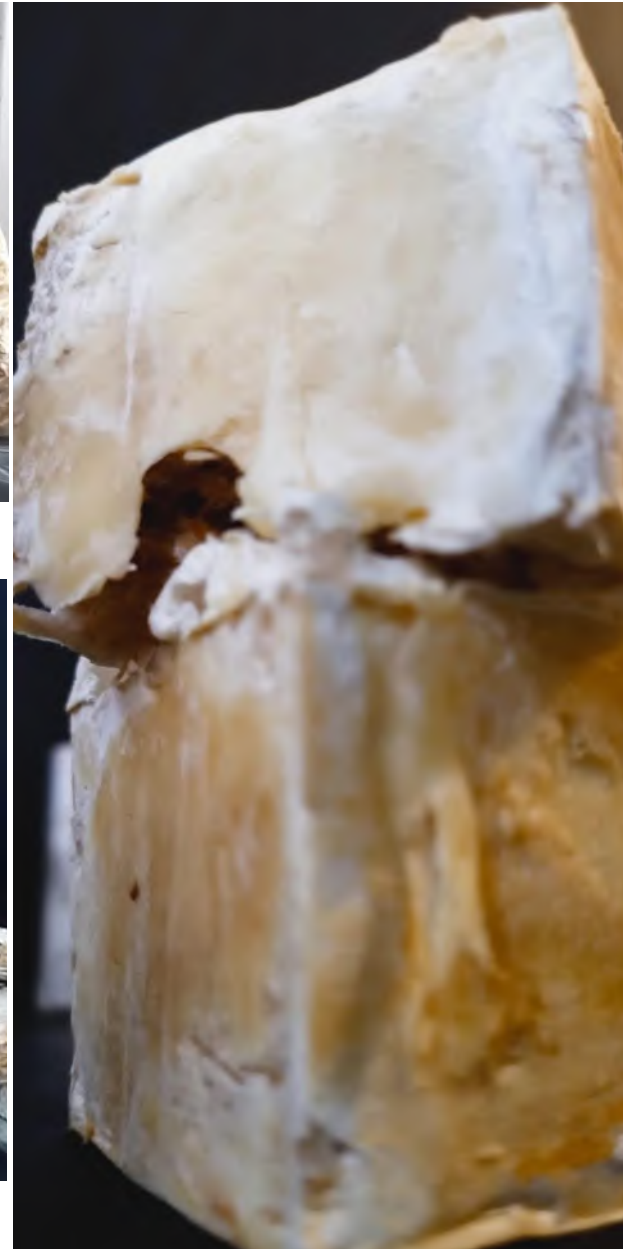
En conclusión, los resultados obtenidos en esta fase indican que, bajo condiciones adecuadas de esterilidad, temperatura y proporción de micelio, es posible desarrollar un biomaterial biobasado robusto y viable para su uso en aplicaciones ambientales críticas, como el tratamiento y filtrado de agua en contextos de emergencia o sostenibilidad.



Figura 74. Especímenes *Pleurotus Ostreatus*-Gris en fibras de Trigo, Avena y coco.



Figura 75. Especímenes *Pleurotus Ostreatus*-Gris en fibra de Trigo y Avena



ITSi

Resultados
FASE II
Diseño y
Prototipado

FASE II: Resultados Diseño y Prototipado

Diseño digital y Morfología, fabricación producción y herramientas digitales

Inicialmente se realizó el concepto base del diseño, en donde se tuvieron diferentes factores inicialmente, se estudia las formas y patrones que realizan las redes de micelio naturalmente en su proceso de crecimiento, se integran factores de características físicas como la densidad del material y geometría, para obtener formas y patrones eficientes para disponer en modulaciones y escalas elementos que integran características de regeneración y aporten a la mitigación de impactos nocivos.

Además, las respuestas en de los aspectos físicos y geométricos, que se integran a partir de procesos simbióticos en el diseño de materiales de restauración permiten la creación de sistemas más dinámicos y resilientes. El micelio, al actuar en simbiosis con otras especies vegetales como los sustratos de fibras, establece redes de comunicación que promueven el crecimiento de la biomasa enfocada en la recuperación de hábitats degradados. Este variable simbiótico se puede replicar en sistemas artificiales, donde los materiales diseñados no solo dependen de procesos físicos de filtración sino de la estructura del objeto a utilizar, las redes forman estructuras complejas a partir de espacios llenos y espacios vacíos en donde las hifas de micelio crecen y colonizan el medio de cultivo, para esto se integraron variaciones en los moldes y material para el el



Figura 76. Impresión en 3D, redes y moldes



Figura 77. Impresión en 3D, redes y moldes

proceso de secado de la pieza y la obtención del prototipo. Se desarrollo diferentes exploraciones digitales de patrones y se imprimieron en 3D formas y moldes en los que el micelio garantice su reproducción, se busca estudiar las variantes del material en estado Vivo y en estado biobasado (deshidratado), para esto se desarrollaron los cultivos en diferentes escalas.

Estos moldes son fáciles de instalar y no requieren herramientas especiales, lo que los hace accesibles para cualquier hogar. Además, su diseño compacto, proporcionando una solución práctica y elegante para mejorar la calidad del agua. Con el uso regular de estos filtros, conformado por válvulas internas de micelio donde crece el microorganismo, se disponen diferentes fibras para la porosidad de las piezas, se dejó incubando aproximadamente 15 a 25 días.

Descripción del diseño y las partes del Molde, Ver figura 60

En el desarrollo del prototipo de biofiltro a base de micelio, se establecieron cuatro componentes estructurales clave: base inferior, cuerpo, base superior y sistema de sellado. La base inferior y la base superior fueron diseñadas como superficies de anclaje que permiten el aislamiento del micelio, favoreciendo su fijación y estabilidad durante el crecimiento. El cuerpo fue constituido por láminas modulares cuya altura puede ser ajustada según los requerimientos funcionales del sistema, lo que facilita su adaptabilidad a diferentes entornos y condiciones de uso. Para garantizar la integridad estructural y funcional del biofiltro, se

implementó un sistema de sellado en las juntas, utilizando materiales aislantes que bloquean la entrada de oxígeno y luz, condiciones críticas para el control del crecimiento del micelio. Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas de flotabilidad mediante piezas de micelio de 5 × 5 cm y 3 cm de espesor, en las cuales se observó que dicho espesor resulta insuficiente para mantener la flotación constante en medios acuáticos. Estos resultados sugieren la necesidad de incrementar el espesor del biomaterial, con el fin de optimizar su capacidad de flotación sin comprometer la funcionalidad del sistema como biofiltro.

La implementación de moldes con características plásticas en el desarrollo de prototipos biobasados en micelio ha demostrado ser una estrategia efectiva para controlar el crecimiento y la morfología del micelio durante su incubación. El uso de moldes permite una configuración precisa de la forma y el diseño del prototipo, facilitando la creación de estructuras homogéneas y funcionales, especialmente durante el período crítico de incubación. Al asegurar que el micelio quede completamente cubierto durante los 15 días en condiciones de cuarto oscuro, se optimiza su crecimiento, evitando alteraciones externas que podrían interferir con la expansión y colonización del sustrato. Esta cobertura controlada no solo garantiza un desarrollo uniforme, sino que también crea un entorno adecuado para la proliferación eficiente del micelio.(ver Figuras 76 y 78).

Además, el uso de materiales plásticos para los moldes ofrece ventajas significativas en términos de reutilización y prototipado en serie. La durabilidad y flexibilidad del



Figura 78. Moldes Prototipo de micelio de pleurotus ostreatus en fibra de trigo Septiembre de 2024

plástico permiten la fabricación de moldes que pueden ser reutilizados múltiples veces sin perder sus características funcionales, lo que contribuye a la eficiencia del proceso de producción y reduce costos. Esta capacidad de reutilización facilita la creación de múltiples prototipos de manera continua, permitiendo escalar el proceso y obtener una producción más estandarizada y replicable. Por otro lado, la posibilidad de adaptar el diseño y ensamble del molde según las necesidades específicas de cada proyecto abre la puerta a la personalización de los prototipos, lo que es fundamental en el desarrollo de productos bio-basados en micelio que puedan ser ajustados a diferentes aplicaciones, desde el diseño de materiales sostenibles hasta soluciones innovadoras en biotecnología.

Estos resultados sugieren la necesidad de incrementar el espesor del biomaterial, con el fin de optimizar su capacidad de flotación sin comprometer la funcionalidad del sistema como biofiltro.

La implementación de moldes con características plásticas en el desarrollo de prototipos biobasados en micelio ha demostrado ser una estrategia efectiva para controlar el crecimiento y la morfología del micelio durante su incubación. El uso de moldes permite una configuración precisa de la forma y el diseño del prototipo, facilitando la creación de estructuras homogéneas y funcionales, especialmente durante el período crítico de incubación. Al asegurar que el micelio quede completamente cubierto durante los 15 días en condiciones de cuarto oscuro, se optimiza su crecimiento, evitando alteraciones externas que podrían interferir con la expansión y colonización del

sustrato. Esta cobertura controlada no solo garantiza un desarrollo uniforme, sino que también crea un entorno adecuado para la proliferación eficiente del micelio. Ver la figura 79, en donde se muestra el prototipo obtenido con la relación de la neurona en los moldes.

Además, el uso de materiales plásticos para los moldes ofrece ventajas significativas en términos de reutilización y prototipado en serie. La durabilidad y flexibilidad del plástico permiten la fabricación de moldes que pueden ser reutilizados múltiples veces sin perder sus características funcionales, lo que contribuye a la eficiencia del proceso de producción y reduce costos. Esta capacidad de reutilización facilita la creación de múltiples prototipos de manera continua, permitiendo escalar el proceso y obtener una producción más estandarizada y replicable. Ver figuras 80, 81, 82 y 83 en donde se ilustra el desarrollo proyectual del prototipo inicial, reportando sus hallazgos y respuesta del material. Por otro lado, la posibilidad de adaptar el diseño y ensamble del molde según las necesidades específicas de cada proyecto abre la puerta a la personalización de los prototipos, lo que es fundamental en el desarrollo de productos bio-basados en micelio que puedan ser ajustados a diferentes aplicaciones, desde el diseño de materiales sostenibles hasta soluciones innovadoras en biotecnología.



Figura 79. Prototipo de micelio de pleurotus ostreatus en fibra de trigo Septiembre de 2024

Iteraciones



Anclaje con peso a los cause de agua

Exploraciones Propuesta del Prototipo A
Desarrollo planimétrico

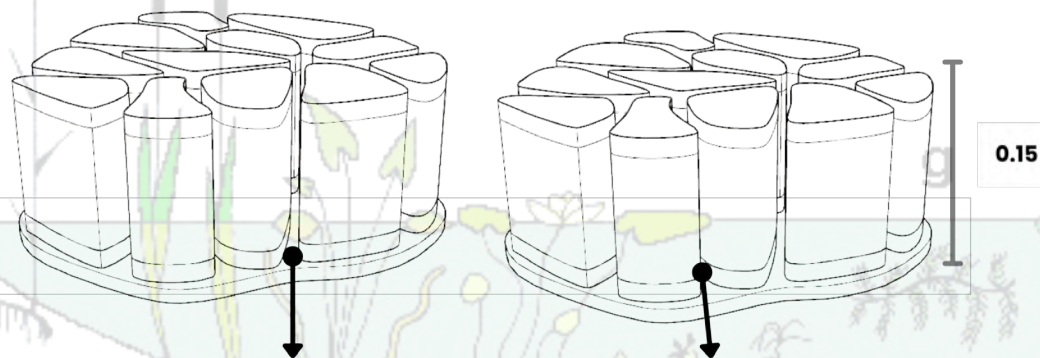
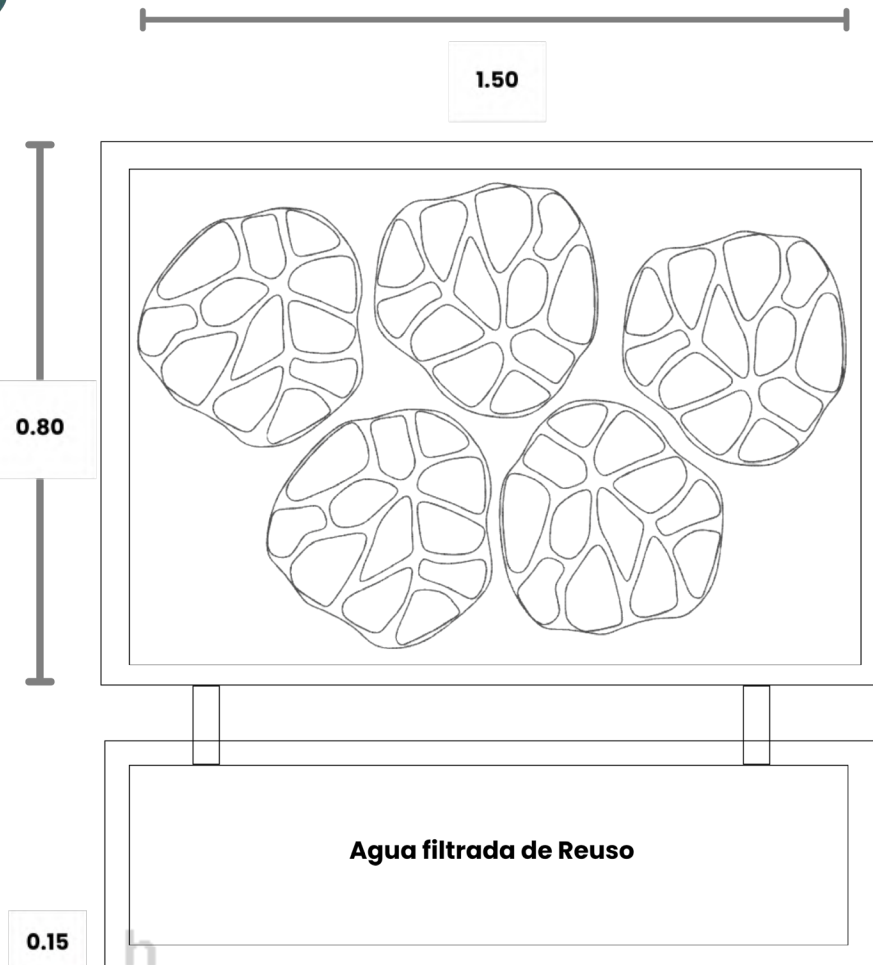
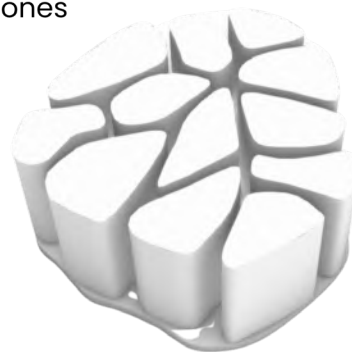
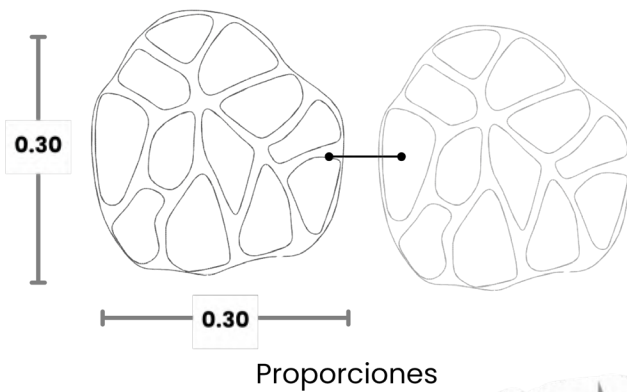


Figura 80. Desarrollo planimétrico de propuesta A



Figura 81. Desarrollo morfológico y registro fotográfico de propuesta A



Figura 82. Registro fotográfico de propuesta aplicación piloto en agua



Figura 83. Registro fotográfico de propuesta aplicación piloto en agua

Resultados FASE II Diseño y Prototipado

Optimización del Diseño de Moldes y Producción de Bloques de Micelio para Sistemas de Filtración

Durante la segunda fase experimental del proyecto, se llevaron a cabo diversas modificaciones en el diseño inicial de los moldes Ver la figura 84 en donde reúne los procesos de diseño con el objetivo de mejorar las condiciones de crecimiento del micelio y prevenir focos de contaminación. En particular, se identificó que los moldes generados por impresión 3D presentaban vacíos o imperfecciones que propiciaban la acumulación de humedad y materia orgánica no colonizada, lo que incrementaba significativamente el riesgo de proliferación de organismos contaminantes como el Trichoderma.

Para abordar esta problemática, se rediseñó el molde inicial, ampliando el volumen de trabajo y creando una estructura más adecuada para la producción de bloques filtrantes de mayor escala. Este rediseño permitió integrar variables de forma, ventilación y simetría estructural, ajustadas con ayuda de sistemas computacionales mediante los cuales se desarrollaron propuestas formales escalables. Se utilizó software de modelado paramétrico como Rhinoceros 3D y su complemento Grasshopper, permitiendo crear patrones

complejos inspirados en la geometría del crecimiento micelial y en sus capacidades estructurales.

En esta etapa se compararon dos tipos de moldes: uno fabricado en MDF y otro en acrílico transparente de 3 ml. Los resultados mostraron diferencias notables entre ambos. Ver la figura 85 en donde se observa el molde de acrílico resultó especialmente eficaz, ya que su transparencia permitió un monitoreo visual constante del proceso de colonización y crecimiento del micelio. Además, su superficie lisa evitó acumulaciones de esporas no deseadas, facilitando la reutilización del molde para la producción en serie de prototipos. Por otro lado, el molde de MDF, a pesar de ser más económico, presentó un caso de contaminación cruzada por *Trichoderma* tras dos semanas de incubación, lo que comprometió la integridad del bloque y obligó a su descarte. Este material fue posteriormente destinado a composta en jardines experimentales, cerrando así el ciclo de aprovechamiento de residuos orgánicos.

En cuanto al desarrollo morfológico de los bloques, se logró un crecimiento exitoso del micelio gracias a la utilización de material previamente cosechado en estado de madurez óptima. Esto permitió su manipulación y disposición dentro del molde para formar estructuras específicas. Las formas creadas incorporaron aberturas inspiradas en la red natural de hifas miceliales, con el fin de generar estructuras porosas que no solo faciliten el paso del agua, sino que también puedan contener especies vegetales, integrándose así a sistemas vivos de tratamiento y filtración. Estas aberturas, al tiempo que mejoran la funcionalidad del biomaterial, también le otorgan cualidades estéticas y estructurales

adaptadas a entornos urbanos o naturales.

La implementación de una estructura central en forma de red dentro del molde permite que los bloques filtrantes se conviertan en elementos multifuncionales, capaces de servir como sustrato para vegetación, filtro poroso y elemento estructural liviano. Esta estrategia proyecta un enfoque sistémico y ecológico al diseño del material, integrando vida vegetal y fúngica en un solo sistema bioinspirado.

Finalmente, el molde definitivo utilizado para la producción de bloques medía 20 x 30 x 10 cm, tamaño óptimo para asegurar una colonización completa, fácil manipulación y modularidad. Esta escala, combinada con los patrones generados digitalmente, permitió avanzar hacia una producción reproducible y adaptable a distintos escenarios de aplicación, desde entornos domésticos hasta sistemas de biofiltración urbana.

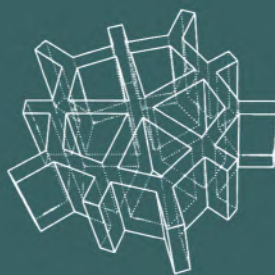
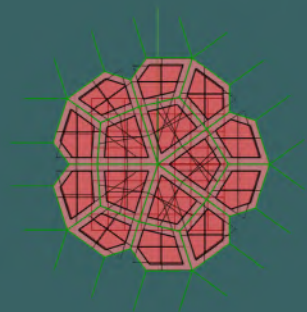
Disposición del sistema de bloques de filtrado en sistemas de humedales horizontales, la agrupación de los bloques del micelio se disponen en placas de ensamble desarrollados del mismo material de micelio, se busca que los módulos se puedan poner en zonas con aguas contaminadas, para esta acercamiento con el filtrado las aguas con presencia de materiales contaminantes, deberán tener diferentes etapas y material para garantizar que el sistema vivo como micelio logre realizar el proceso de Biorremediar contaminantes específicos.

Ver la figura 86, las placas de ensamble son construidas en base al humedal donde se disponen los filtros, esta

Exploraciones Propuesta del Prototipo B



Código Grasshopper



Molde en Acrílico

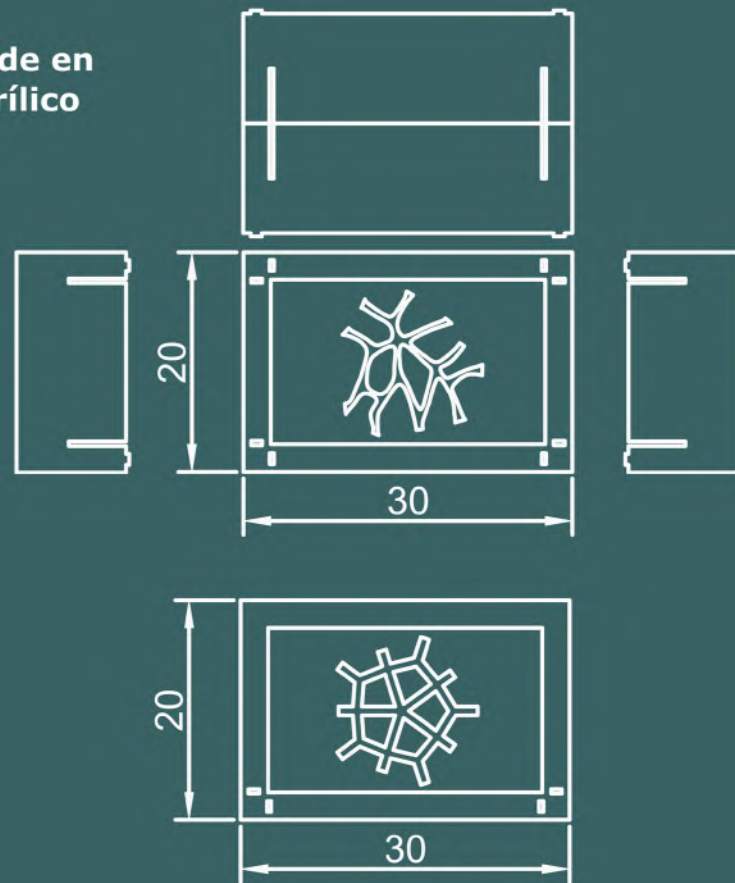


Figura 84. Optimización del Diseño de Moldes y Producción de Bloques de Micelio para Sistemas de Filtración



a 1



Día 22



Material Biobasado de micelio, 500 g



Pleurotus ostreatus sustrato de trigo en molde de acrílico



Figura 85. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de trigo en molde de acrílico y bolsas de kilos de mas de 30 días de edad

Exploraciones Propuesta del Prototipo B digital y disposición de módulos

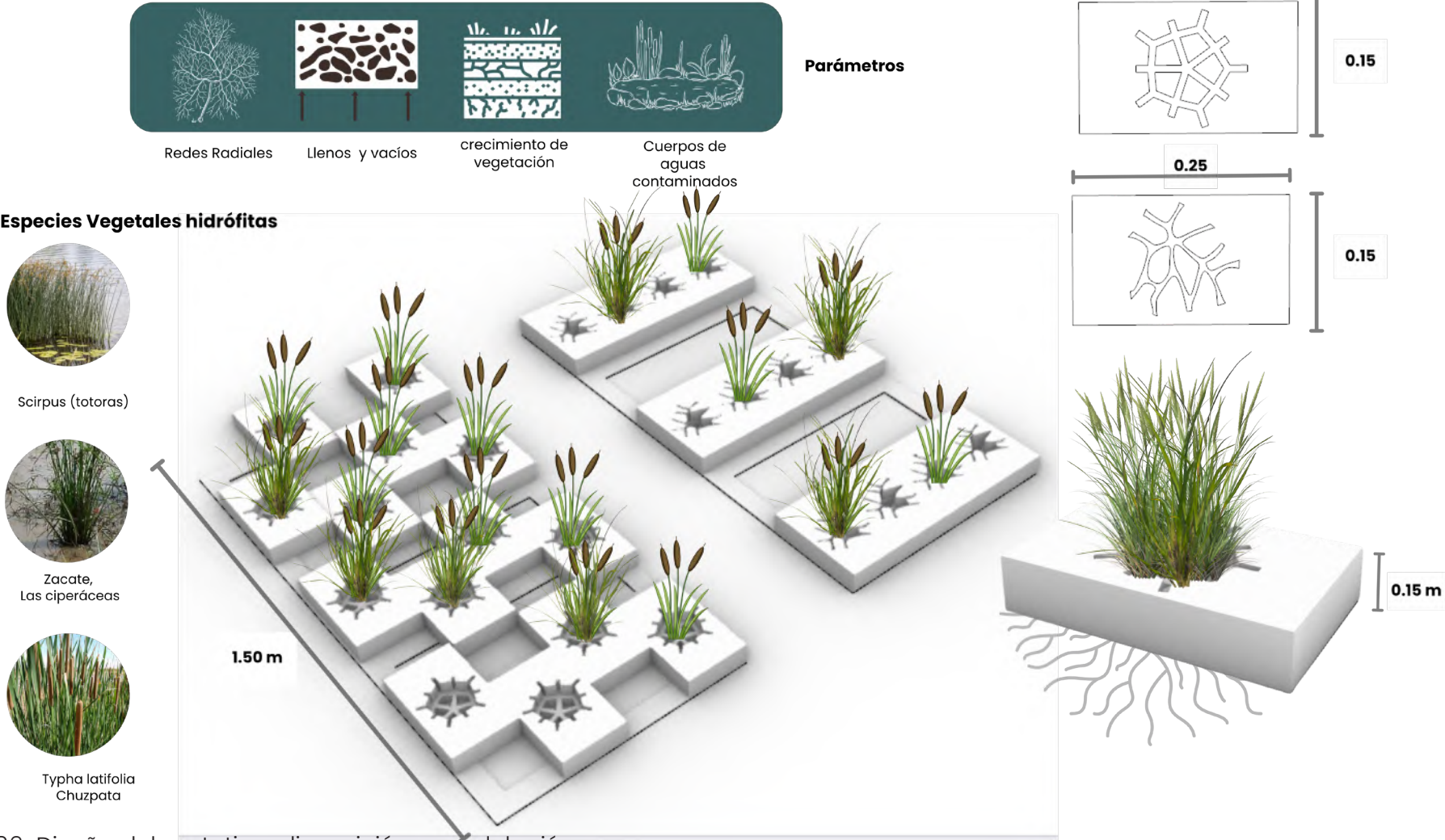


Figura 86. Diseño del prototipo, disposición y modulación

estructura funciona como mecanismo articulador del cada bloque del biofiltro, una de las ventajas del micelio es la capacidad de expender sus hifas en una etapa de crecimiento y expansión

Se tuvieron parámetros específicos para la disposición y el ensamble de las piezas de biofiltro, las redes radiales los llenos y vacíos permiten la disponer especies vegetales hidrófitas, que también presentan características para Biorremediar las condiciones del agua, estas posibilidades permiten la iteración de diversos bloques de filtrado es necesario establecer patrones que no tapen por completo los cuerpos de agua, lo que incrementaría afloración de especies vegetales que no se desean, en las figuras se muestra como se disponen de forma horizontal los bloques de micelio de filtrado las dimensiones y proporciones de cada bloque. Se integra también la relación del rendimiento del material con la cantidad del micelio implementado en cada bloque, estas proporciones integra la capacidad que biofiltro para degradar contaminantes del agua y el aporte del diseño y el desarrollo del biofiltro de micelio para el tratamiento y saneamiento del agua, Ver la figura 87 en donde reúne el crecimiento del Bloque de biofiltro.



Figura 87. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de trigo en molde de acrílico de más de 30 días de edad



Figura 88. Registro fotográfico del biomaterial de Micelio Pleurotus Gris con fibra de coco en microcosmos plásticos, de más de 30 días de edad, con presencia de contaminantes y ciclo final en compostaje y zonas de jardín

ITSi

Resultados FASE III

Filtrado del agua

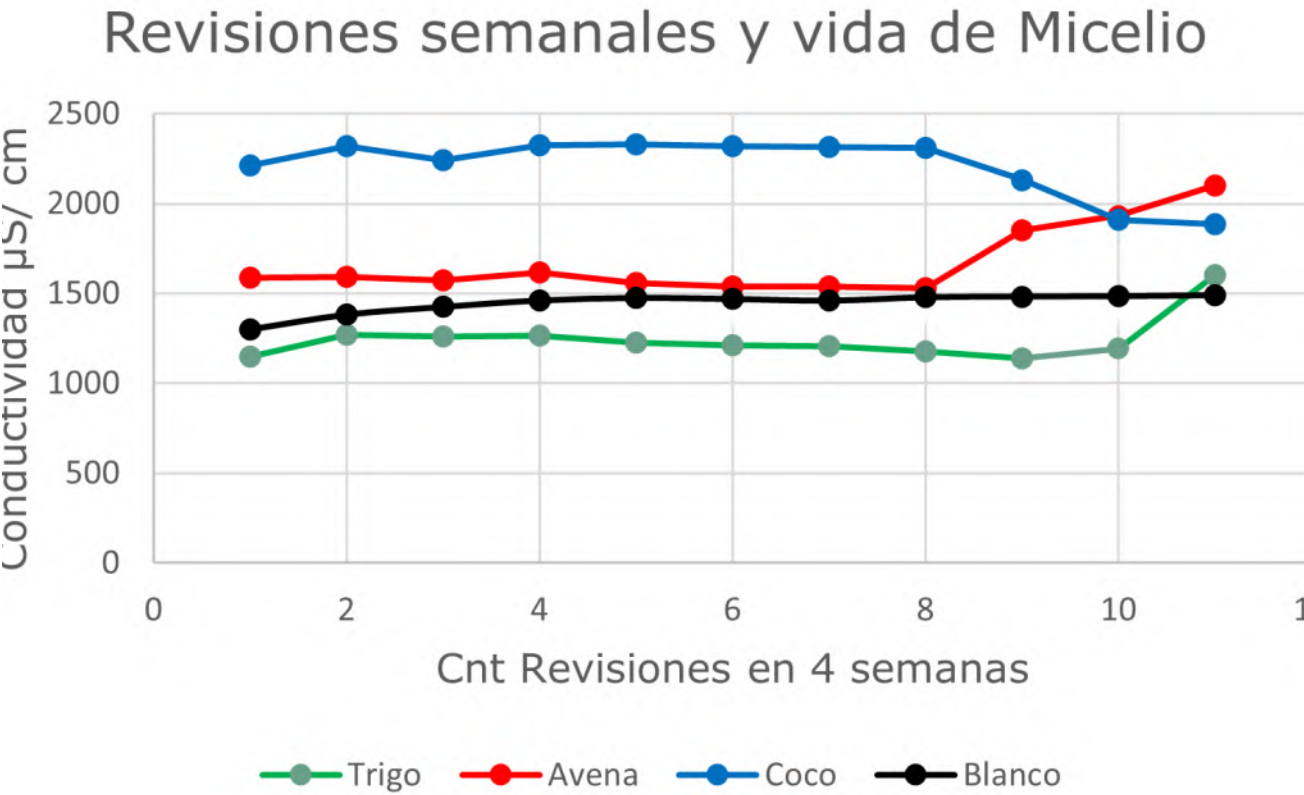
Fase III: Filtración de Agua con Micelio y Evaluación de la Edad de Vida del Organismo

Durante la Fase III del experimento, se evaluó el comportamiento del micelio de *Pleurotus Ostreatus* en condiciones de inmersión acuática continua, con el objetivo de medir su efectividad como biofiltro y su resistencia estructural y biológica a lo largo del tiempo. Esta etapa se centró en el análisis de microcosmos experimentales, diseñados con distintos sustratos orgánicos y proporciones controladas de nutrientes, simulando un sistema de tratamiento de agua en condiciones semicontroladas. Ver figura 88, en donde reporta contaminación de sustrato y disposición final del material

Se utilizó un total de 1 kg de micelio colonizado al 75% en sustratos específicos de trigo, avena y fibra de coco, el cual fue dispuesto en un sistema de biofiltración experimental con 6 litros de agua tratada con nutrientes esenciales (N, P, K) en una concentración del 1% por litro. El ensayo se mantuvo bajo condiciones controladas durante un período de tres semanas, con revisiones semanales realizadas bajo estrictos protocolos de esterilidad y desinfección, a fin de

prevenir la contaminación cruzada y asegurar la validez de los resultados. Durante el proceso, se llevaron a cabo registros periódicos de conductividad eléctrica, así como observaciones visuales de parámetros físicos del agua (color y turbidez), complementadas con evaluaciones del estado estructural del micelio, incluyendo cambios en coloración, textura y expansión de hifas. A continuación, se detallan los resultados observados en cada escenario experimental, los cuales evidencian variaciones en la capacidad de filtración del micelio según el tipo de sustrato utilizado.

En el Escenario 1, correspondiente al uso de micelio colonizado sobre sustrato de trigo (75% de semilla por peso total del fibra), se observaron resultados altamente favorables en términos de estabilidad estructural y desempeño funcional durante un periodo de tres semanas. El micelio presentó una estructura robusta, sin evidencia de moho ni degradación significativa, y con un crecimiento acelerado de hifas que se expandieron tanto en la superficie del sustrato como a lo largo de las paredes internas del contenedor. Visualmente, se identificó la formación de una red micelial densa con colonización vertical y horizontal, lo que indica un comportamiento adaptativo eficiente frente al entorno físico del sistema. El agua tratada mostró un cambio progresivo hacia un color amarillo oscuro, lo cual sugiere una interacción activa entre el micelio y los nutrientes disueltos. En cuanto a la efectividad del proceso de filtración, se registró una reducción gradual en la conductividad eléctrica del agua, lo que implica una potencial absorción de nutrientes y partículas suspendidas. Este comportamiento podría estar relacionado con las propiedades físico-químicas del trigo como sustrato, que favorecen la actividad metabólica del micelio. La edad



Revisión	Semana 1		Semana 2			Semana 3			Semana 4		
	$\mu\text{S/cm}$ 1	$\mu\text{S/cm}$ 2	$\mu\text{S/cm}$ 3	$\mu\text{S/cm}$ 4	$\mu\text{S/cm}$ 5	$\mu\text{S/cm}$ 6	$\mu\text{S/cm}$ 7	$\mu\text{S/cm}$ 8	$\mu\text{S/cm}$ 9	$\mu\text{S/cm}$ 10	$\mu\text{S/cm}$ 11
Trigo	1149	1270	1260	1264	1228	1210	1206	1180	1139	1194	1600
Avena	1587	1593	1575	1616	1559	1540	1540	1530	1850	1932	2100
Coco	2213	2319	2243	2323	2331	2320	2315	2310	2132	1909	1900
Blanco	1300	1382	1425	1461	1475	1469	1460	1479	1483	1485	1450

Figura 89. Gráfico Pruebas de conductividad al agua de los escenarios Trigo, Avena, coco Y base de contraste Blanco y línea de vida del Micelio en proceso de filtración



funcional del sistema se mantuvo estable durante todo el periodo de observación, sin colapsos estructurales ni signos de senescencia fúngica, lo que resalta la viabilidad del micelio sobre trigo como componente eficaz en sistemas de biofiltración respuesta de esto son los datos obtenidos en la revisión del vida del micelio en los cuales se agrupó variables de conductividad y cambio de las condiciones del agua, en la figura .89 se agrupan los datos y las gráficas de las variables.

En el Escenario 2, donde se utilizó avena como sustrato con un 75% de colonización micelial, se observó un crecimiento más moderado en comparación con el escenario anterior. El micelio formó una red superficial y delgada, con una expansión predominantemente horizontal y un desarrollo menos agresivo que el observado sobre trigo. A nivel visual, se identificó una película micelial estable en la capa superior del agua, sin presencia de mohos ni señales de deterioro estructural. El agua mantuvo un color amarillo claro con baja opacidad, lo que indica una menor liberación de compuestos o partículas en suspensión. En términos de filtración, se registró una disminución moderada en la conductividad eléctrica, sugiriendo un proceso de absorción de nutrientes sostenido pero menos eficiente, posiblemente debido a la menor densidad estructural y contenido nutricional de la avena como sustrato. A pesar de su menor actividad superficial observable, el micelio se mantuvo funcional durante las tres semanas de observación, sin signos de descomposición ni senescencia, lo que indica una estabilidad biológica aceptable bajo estas condiciones.

En el Escenario 3, se empleó fibra de coco como sustrato con un 75% de colonización micelial. El primer intento

experimental fue descartado debido a una contaminación temprana por hongos competidores del género *Trichoderma*, lo cual obligó a repetir el ensayo bajo condiciones reforzadas de esterilidad. En el segundo intento, se observaron los resultados durante un periodo de dos semanas. Durante la primera semana, el micelio mostró una expansión inicial favorable, con colonización parcial de los bloques sumergidos y una buena adhesión al sustrato. No obstante, en la segunda semana se evidenció la formación de una capa superficial blanquecina, posiblemente asociada a la acumulación de metabolitos o procesos fermentativos, indicando un inicio de estrés biológico atribuible a la exposición prolongada al medio acuático. El color del agua se tornó ligeramente turbio con un tono amarillento, lo que sugiere una actividad metabólica moderada, pero también una posible liberación de compuestos por descomposición del sustrato. A pesar de cierta recuperación inicial, el sistema evidenció una menor estabilidad en comparación con los escenarios anteriores, y el micelio presentó signos de decaimiento superficial a partir del día 14. Estos resultados sugieren que, aunque la fibra de coco permite una colonización inicial adecuada, su comportamiento bajo condiciones de inmersión continua lo hace más propenso a la desestabilización y a la contaminación microbiana, limitando su funcionalidad en aplicaciones de biofiltración prolongada. Ver las figuras 90 y 91 en donde se reporta el proceso del filtrado del agua y los cambios en el micelio en las diferentes edades del filtrado.



Figura 90. Proceso de filtración de microcosmo de Coco con el sistema de riego construido



Figura 91. Escenario 3 de coco en proceso de filtración y toma de muestras de las aguas de estudio

ITSi

Resultados FASE IV Pruebas de Validación EIS

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

se aplicó como técnica de validación para evaluar la calidad del agua tratada mediante bloques de micelio, enfocándose en la variación de la resistencia eléctrica del sistema a lo largo del tiempo. La resistencia se relacionó con los cambios en la composición iónica y la disminución de contaminantes disueltos, permitiendo cuantificar el efecto del tratamiento sobre el medio acuoso. Los resultados se presentan en diagramas de Nyquist generales y en ampliaciones a altas frecuencias que permiten observar con mayor detalle las variaciones en la resistencia del sistema. Cada diagrama incluye cuatro curvas de impedancia diferenciadas según el sustrato empleado para el crecimiento del micelio (avena, trigo y coco) y una curva correspondiente al agua de contraste, que no fue sometida a filtración. El análisis considera dos momentos de filtrado: un primer periodo de una semana y un segundo de tres semanas, presentándose los resultados de la validación para ambos casos.

Resultados de EIS: Agua Filtrada por Micelio – Periodo de 1 Semana

En la Figura 92 se presentan las mediciones de impedancia para las tres muestras de agua filtrada y el blanco de contraste en configuración de 3E, permitiendo discriminar en los cuatro casos una contribución resistiva a altas frecuencias que genera un desplazamiento de los espectros hacia la derecha del eje X positivo. En la configuración de 3E, la resistencia medida engloba el material presente entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, en compañía de un contraelectrodo (CE) que permite cerrar el circuito, fijar un potencial de circuito abierto y disminuir contribuciones externas al sistema de estudio asociadas al potencióstato y a los dispositivos de conexión. Para esta configuración de 3E, se presenta en la Figura 2 el circuito equivalente que modela la respuesta del sistema en estudio. El circuito equivalente está conformado por una resistencia (R_1) en serie con un elemento de fase constante (CPE), que describe la contribución no ideal capacitiva del sistema. La primera resistencia, indicada como R_1 , corresponde a la resistencia del agua en los cuatro escenarios analizados. Aunque la disposición inclinada de los puntos experimentales sugiere la presencia del CPE, la tendencia en los puntos no muestra una inclinación significativa que indique una reacción electroquímica rápida en la interfase electrodo-agua asociado a un fenómeno de transferencia de carga.

La medición de impedancia para los cuatro escenarios de filtrado micelio sembrado en avena, trigo, coco y el blanco de contraste mostró variaciones en la resistencia del agua a

altas frecuencias. El blanco, que no fue sometido a ningún proceso de filtrado, presentó una resistencia de $349 \Omega \cdot \text{cm}$. En comparación, el agua filtrada con micelio sembrado en avena mostró una resistencia de $345 \Omega \cdot \text{cm}$, el micelio en coco $240 \Omega \cdot \text{cm}$ y el micelio en trigo $370 \Omega \cdot \text{cm}$. El aumento en la resistencia eléctrica del agua filtrada respecto al blanco indica una disminución en la concentración de iones disueltos, reflejando el efecto del proceso de filtración sobre la calidad del agua. Por otro lado, en los casos de avena y coco, la resistencia final fue menor que la del blanco, lo que implica un aumento en la conductividad del agua. Este efecto puede estar asociado a la liberación de compuestos iónicos desde el micelio y el sustrato durante el filtrado, lo que incrementa la cantidad de especies cargadas en el medio. De los tres métodos de filtrado evaluados, el agua tratada con micelio sembrado en trigo presentó la mayor resistencia, lo que sugiere una mayor reducción de los iones presentes en el medio. Estos resultados permiten establecer una relación entre la resistencia medida y el grado de limpieza iónica alcanzado por cada estrategia de filtración, así como identificar escenarios donde el filtrado no solo retiene contaminantes, sino que también puede incorporar nuevos iones al agua dependiendo de las características del micelio y su sustrato.

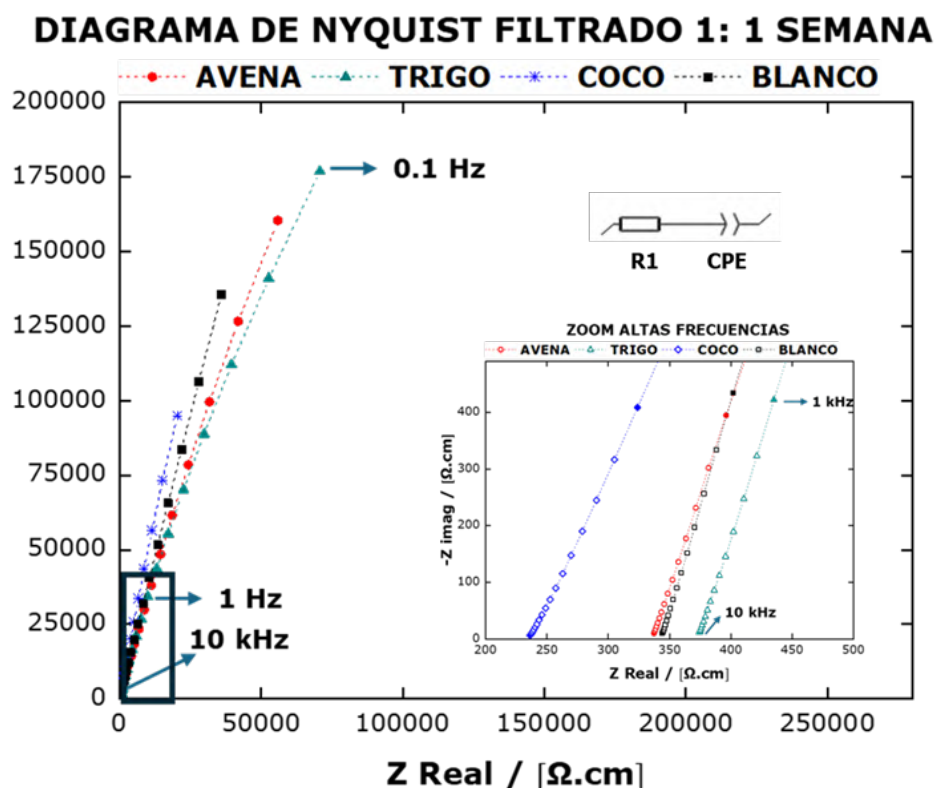


Figura 92. Diagrama de NYQUIST filtrado 1: 1 semana

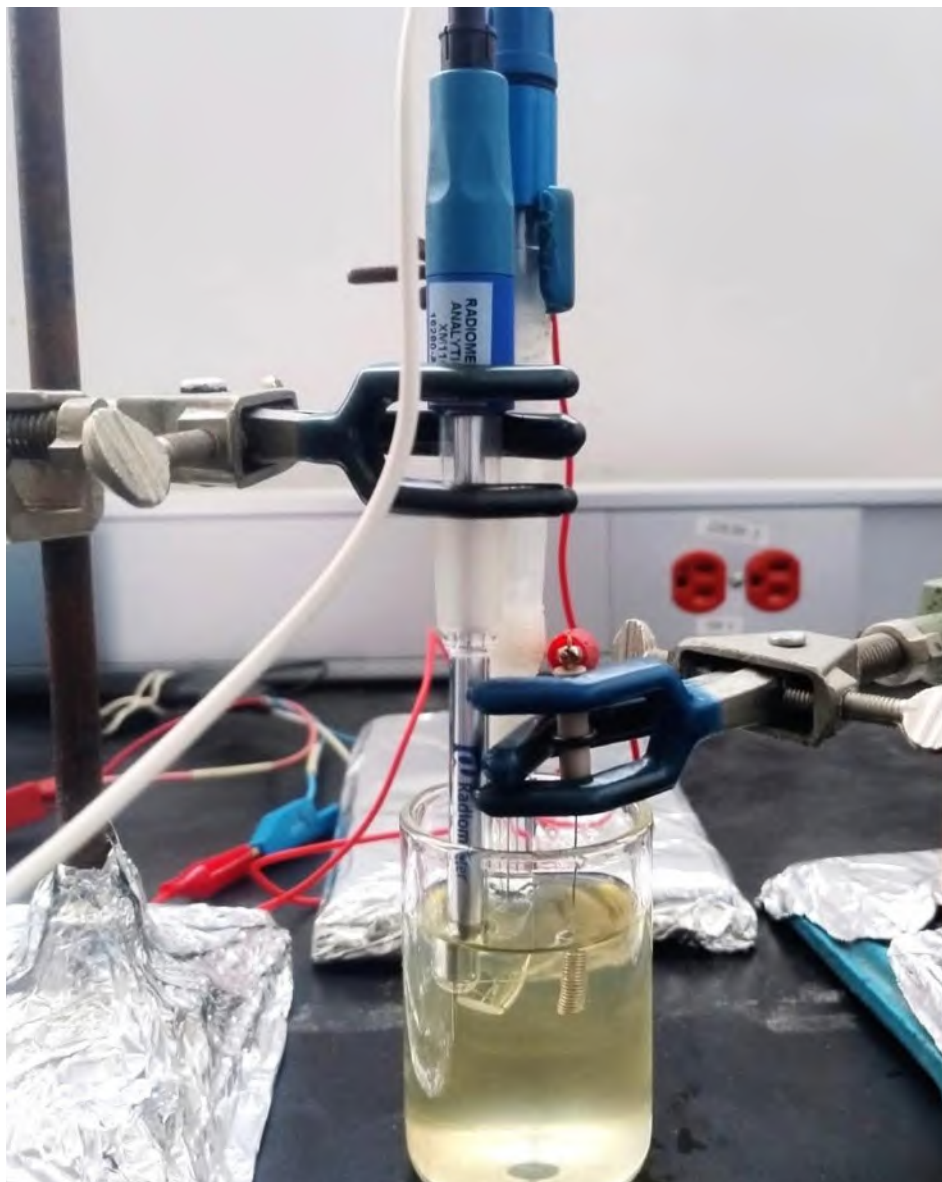


Figura 94. Celda 3 electrodos, EIS.

Fase IV. Resultados de EIS: Agua Filtrada por Micelio – Periodo de 3 Semana

En la Figura 93 se presentan las mediciones de impedancia para las tres muestras de agua filtrada y el blanco de contraste, obtenidas en configuración de tres electrodos (3E). En los cuatro casos se observa una contribución resistiva a altas frecuencias, evidenciada por el desplazamiento de los espectros hacia la derecha del eje X positivo. El circuito equivalente utilizado es el mismo que en los ensayos previos, compuesto por una resistencia (R_1) conectada en serie con un elemento de fase constante (CPE), que representa la contribución capacitiva no ideal del sistema. La resistencia R_1 corresponde a la resistencia del agua en cada uno de los escenarios evaluados. El filtrado por un período de tres semanas muestra una variabilidad en el valor de R_1 en comparación con los resultados obtenidos tras una semana, lo que indica que el tiempo de tratamiento influye en la resistencia eléctrica del agua.

La variación en la resistencia eléctrica a altas frecuencias del agua indica una reducción en la concentración de iones disueltos, reflejando mayor efectividad en la limpieza iónica. El agua filtrada con micelio en trigo mostró la mayor resistencia, aunque tras tres semanas de filtrado presentó una disminución respecto a la medición a una semana. Esta variabilidad podría deberse a cambios en la composición química del micelio y del sustrato, como la liberación de compuestos orgánicos como ácidos húmicos, fenoles y carbohidratos solubles, además de iones provenientes de la degradación parcial del trigo y la alteración estructural del

micelio, que aumentarían la conductividad y disminuirían la capacidad de retención iónica (Wang et al., 2018).

Por otro lado, el agua filtrada con micelio en coco mostró una disminución significativa en la resistencia, indicando un aumento en la conductividad. El coco, especialmente en forma de fibra o coir, contiene minerales y sales solubles como potasio, calcio, magnesio y sodio, que pueden lixiviarse al agua bajo ciertas condiciones (Both et al., 2022). Además, la degradación parcial del sustrato puede liberar ácidos orgánicos y otros compuestos solubles que aumentan la concentración de iones. Así, aunque el micelio puede adsorber ciertos contaminantes, la influencia iónica del sustrato de coco domina el comportamiento eléctrico final del agua, afectando la efectividad de la filtración en términos de reducción iónica. Finalmente, estos resultados se ilustran en la Figura 93, que incluye el circuito equivalente utilizado para modelar el sistema, un diagrama de Nyquist general, y un acercamiento a las altas frecuencias que permite evidenciar con mayor detalle las diferencias en la resistencia eléctrica observadas entre los distintos escenarios de filtrando, ver la figura 94 en donde se muestra la celda de medición empleada para el estudio.

DIAGRAMA DE NYQUIST FILTRADO 1: 1 SEMANA

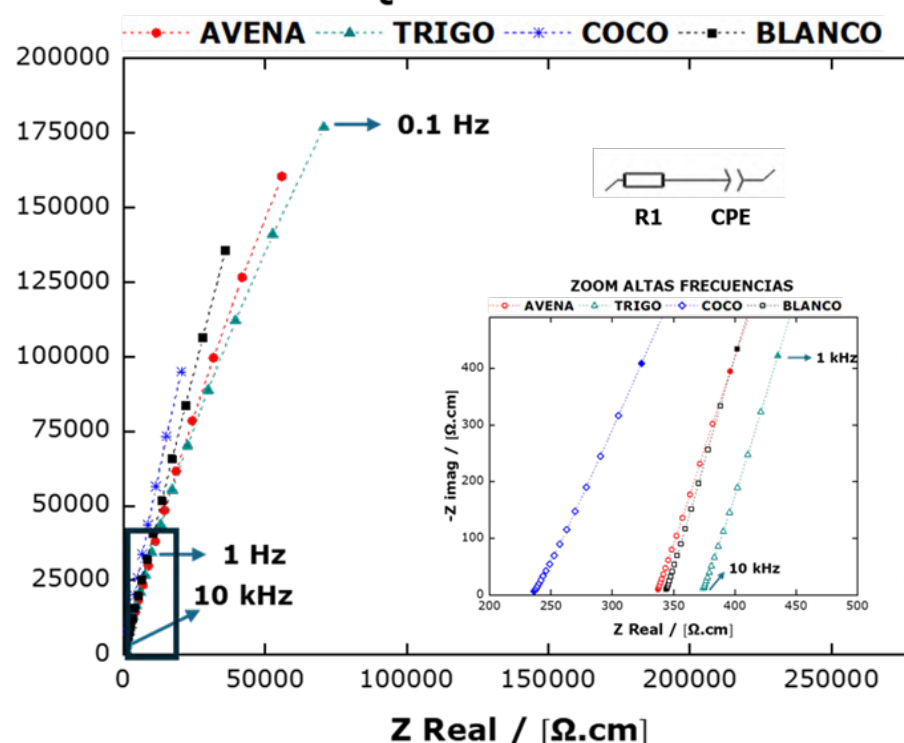


Figura 93. Diagrama de NYQUIST filtrado 2: 3 semana

Resultados FASE IV Pruebas de Validación UV-Vis

Fase IV. Validación de la Filtración por Micelio mediante Pruebas de Espectroscopia UV-visible

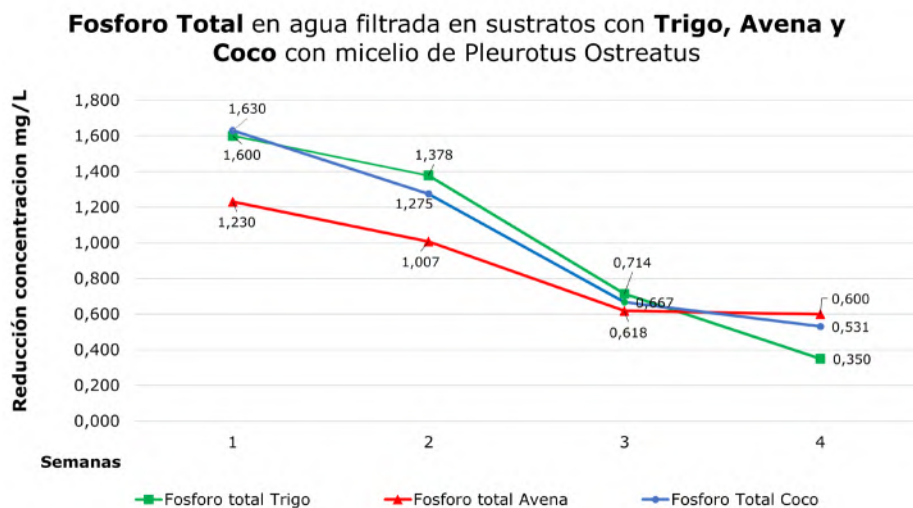


Figura 95. Fosforo Total en agua filtrada en sustratos con Trigo, Avena y Coco con micelio de *Pleurotus Ostreatus*

La técnica de espectroscopia UV-Visible se utilizó como método de validación para evaluar la calidad del agua tratada con bloques de micelio. El análisis permitió identificar y cuantificar diferentes compuestos presentes en el agua fósforo total, ortofosfato, amonio, nitrito y nitrato y determinar los porcentajes de reducción alcanzados en cada caso. Las mediciones se realizaron siguiendo protocolos estandarizados, configurando el espectrofotómetro en rangos de longitud de onda específicos. Para cada parámetro se efectuaron tres repeticiones por muestra, obteniéndose un valor promedio correspondiente a los tres tipos de agua filtrada en el sistema experimental (microcosmos con biomaterial de micelio). Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la fase III del estudio, considerando cuatro tiempos de filtrado y tres sustratos

distintos: trigo, avena y coco.

En la figura 95, se muestra los datos recolectados de Las pruebas de Fósforo total, se obtuvieron respuestas que evidencian disminución en los iones presentes en los tres escenarios de Trigo, Avena y Coco, en donde el escenario con mejor respuesta fue el de trigo en donde la reducción de 1,545mg/L en las mediciones de la primera semana y la toma a al 4 semana de filtrado demostró un porcentaje del 90% en donde se encontró el 0,291 mg/l, por su parte el escenario de Avena registro en la primera semana el porcentaje de 1,173 mg/L y para la semana 4 la reducción de materiales como el fosforo total de 0,541mg/L, pero el escenario con valores mas bajos de la reducción a al 4 semana fue la estrategias con sustrato de coco, en donde se registro inicialmente 1,574mg/L y para la semana 4 de 0,604 mg/L.

En la figura 96, se muestra los datos recolectados de pruebas de ortofosfato respaldaron los datos del fosforo total, los tres escenarios presentaron reducción de los iones pero se identificaron algunas variables especificas en Iso valores de concentración de contaminantes, en esta prueba se identifico que el escenario con mejor respuesta la reducción de iones de ortofosfato fue el escenario de coco en donde el reporte en las pruebas a la semana 1 de filtrado fue de 1.80 mg/L y la reducción a la semana 4 llego hasta 0,341mg/L, por su parte el escenario intermedio fue el implementado micelio con sustrato de avena en donde se registra en la semana 1,7 mg/L y la semana 4 muestra una reducción a 0,541 mg/l, en este sentido el escenario que presento menor reducción en los iones de ortofosfato fue la estrategia del trigo.

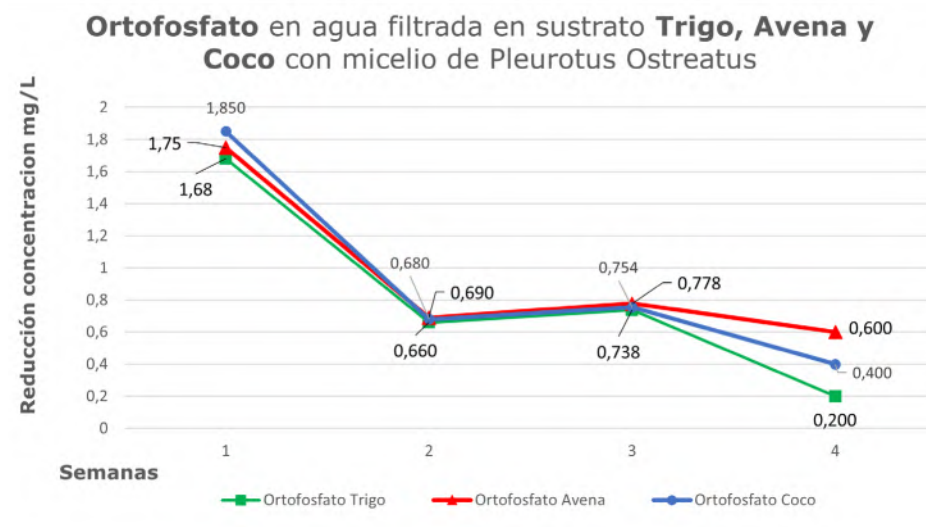


Figura 96. Ortofosfato en agua filtrada en sustrato Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

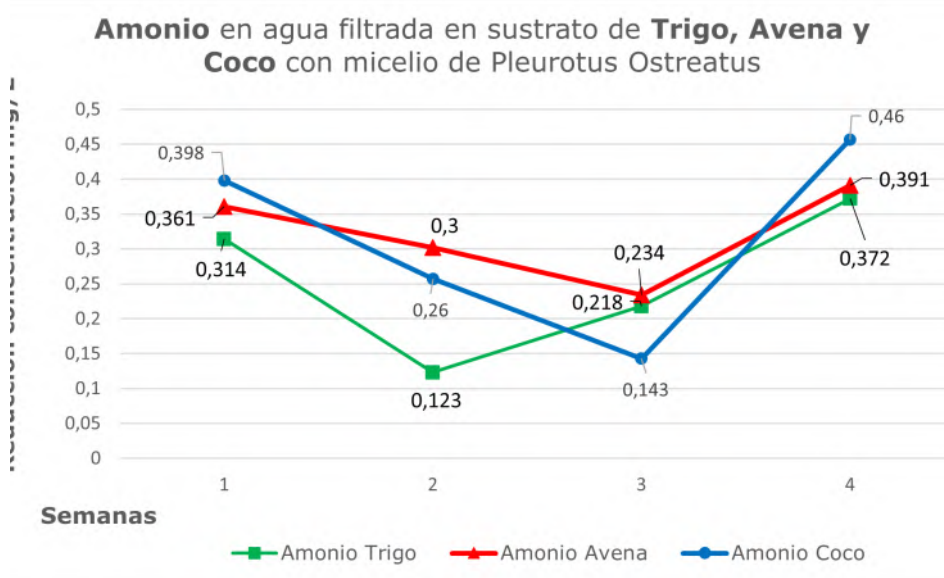


Figura 97. Amonio en agua filtrada en sustrato de Trigo, Avena y Coco con micelio de Pleurotus Ostreatus

En la figura 97 se muestra los datos recolectados de las pruebas específicas para identificar el Amonio se encontraron diversidad en las mediciones de los escenarios estudiados pero también se evidencia una tendencia de reducción de iones, pero se presentó a la 3 semana un incremento en la cantidad de materia orgánica contaminante en el agua en todos los escenarios siendo la fibra de trigo una estrategia con características de disminución en porcentaje de concentración en la semana 1 se registró 0,314 mg/L y para la semana 4 se encuentra un aumento de 0,373 mg/L, se identificó que el filtrado con agua tienen características de reducción de contaminantes en un porcentaje registrado para la primera semana de 0,361 mg/L presentando un aumento en la semana 4 de 0,391 mg/L y el escenario que aumentó más en la concentración de materia orgánica fue la estrategia de coco en donde en la semana 1 se encontraron los valores de 0,398 mg/L y finalmente en la semana 4 se encontró un aumento de la concentración de 0,460 mg/L.

En la figura 98 se muestra los datos recolectados de las pruebas de Nitrito se llevaron a cabo bajo parámetros de cambio de concentraciones para las aguas filtradas, en donde se presentaron variantes de la tendencia en aumento de iones y disminución, en este sentido el resultado con mejor características para limpiar iones de nitrito del agua es la estrategia del Filtro con micelio en Avena, en donde la primera semana se registró una concentración de 0,344 mg/L y para la semana 4 presentó una reducción a 0,035 mg/L, por su parte la estrategia de coco también conservó la tendencia para reducir la materia orgánica en donde se registró inicialmente en la semana 1 0,462 mg/L y para la semana 4 los datos obtenidos fueron de

0,141 mg/L, en contraste con el escenario con filtrado de trigo en el cual a partir de la semana 2 se presentó un aumento en los iones presentes del agua, inicialmente se registra la concentración de 0,019 mg/L y en la semana 4 la concentración se reporta de 0,405 mg/L, esta tendencia se puede dar por el tipo de sustrato implementado para el cultivo del micelio y las propiedades específicas de cada fibra. Es importante mencionar que se realizaron pruebas de nitrato En el cual los valores arrojados en de diferentes muestras eran inferiores a las lecturas de las técnicas lo que habla de poca presencia de este material en las aguas filtradas.

En la figura 99 y 50 se reporta registro fotográfico delas pruebas del agua y se realiza un esquema de resumen de las fases de validación y sus hallazgos, el análisis estadístico mostró que el **ortofosfato presentó una reducción promedio del 65,56 %**, con una desviación estándar de aproximadamente 14 %, lo que indica un comportamiento relativamente constante entre los escenarios evaluados. En el caso del **fósforo total**, se obtuvo la mayor eficacia global, con una reducción promedio del **74,62 %**. Por su parte, el amonio reflejó una tendencia negativa, con un promedio de -14 %, lo que significa un incremento en la concentración de este ion en los diferentes sustratos. En relación con el nitrito, los resultados fueron variables: mientras en el escenario con trigo se observó un aumento, en los tratamientos con avena y coco se alcanzaron reducciones significativas. Finalmente, para el nitrato, no fue posible calcular estadísticas debido a que las concentraciones medidas se encontraron por debajo del límite de detección del método.

Nitrito en agua filtrada en sustrato de **Trigo, Avena y Coco** con micelio de *Pleurotus Ostreatus*

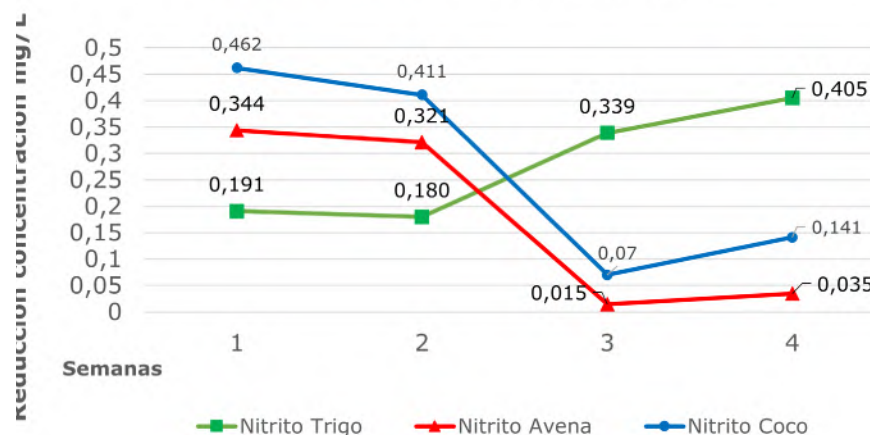
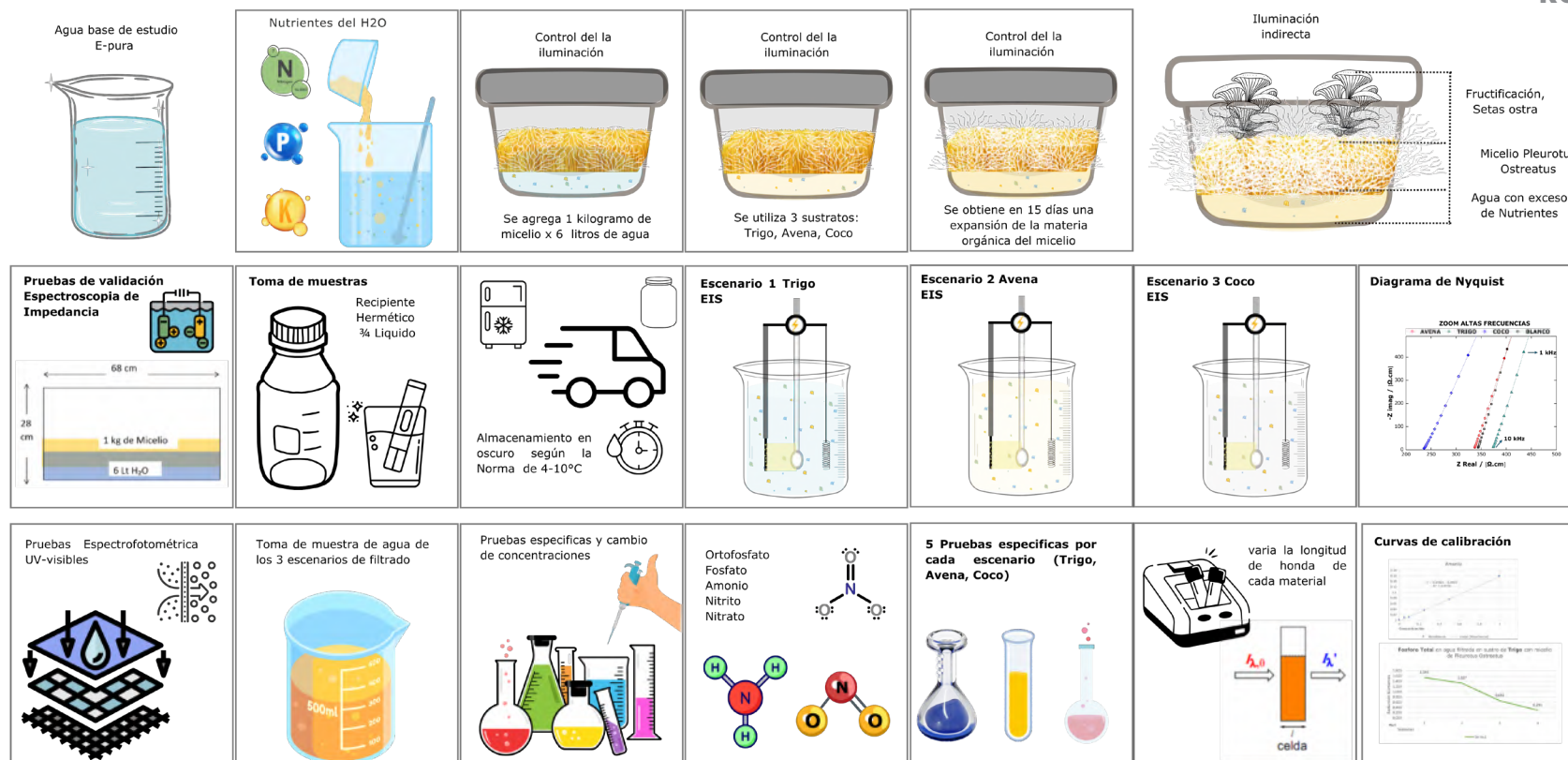


Figura 98. Nitrito en agua filtrada en sustrato de Trigo, Avena y Coco con micelio de *Pleurotus Ostreatus*



Figura 99. Diseño Escenario A, Módulo de Filtración Vertical

Resultados Fase IV



	Fosforo total	Ortostato	Amonio	Nitrito			
Escenario 1 Sustrato de Trigo con Micelio Pleurotus Ostreatus	70%	90%	80%	80%		3 kg micelio y sustrato	
Escenario 2 Sustrato de Avena con Micelio Pleurotus Ostreatus	70%	70%	70%	90%		18 litros de agua	
Escenario 3 Sustrato de Coco con Micelio Pleurotus Ostreatus	90%	80%	60%	70%		Cantidad de agua filtrada	
Capacidad en tiempo de vida del micelio							
Semana 1		Semana 2	Semana 3	Semana 4		Diseño Regenerativo	

25 kg de micelio para el tratamiento de 150 litros de agua

Células contenedoras de filtrado recipientes plásticos

Sistema de humedales flujo horizontal

Figura 100. Diseño Escenario A, Módulo de Filtración Vertical

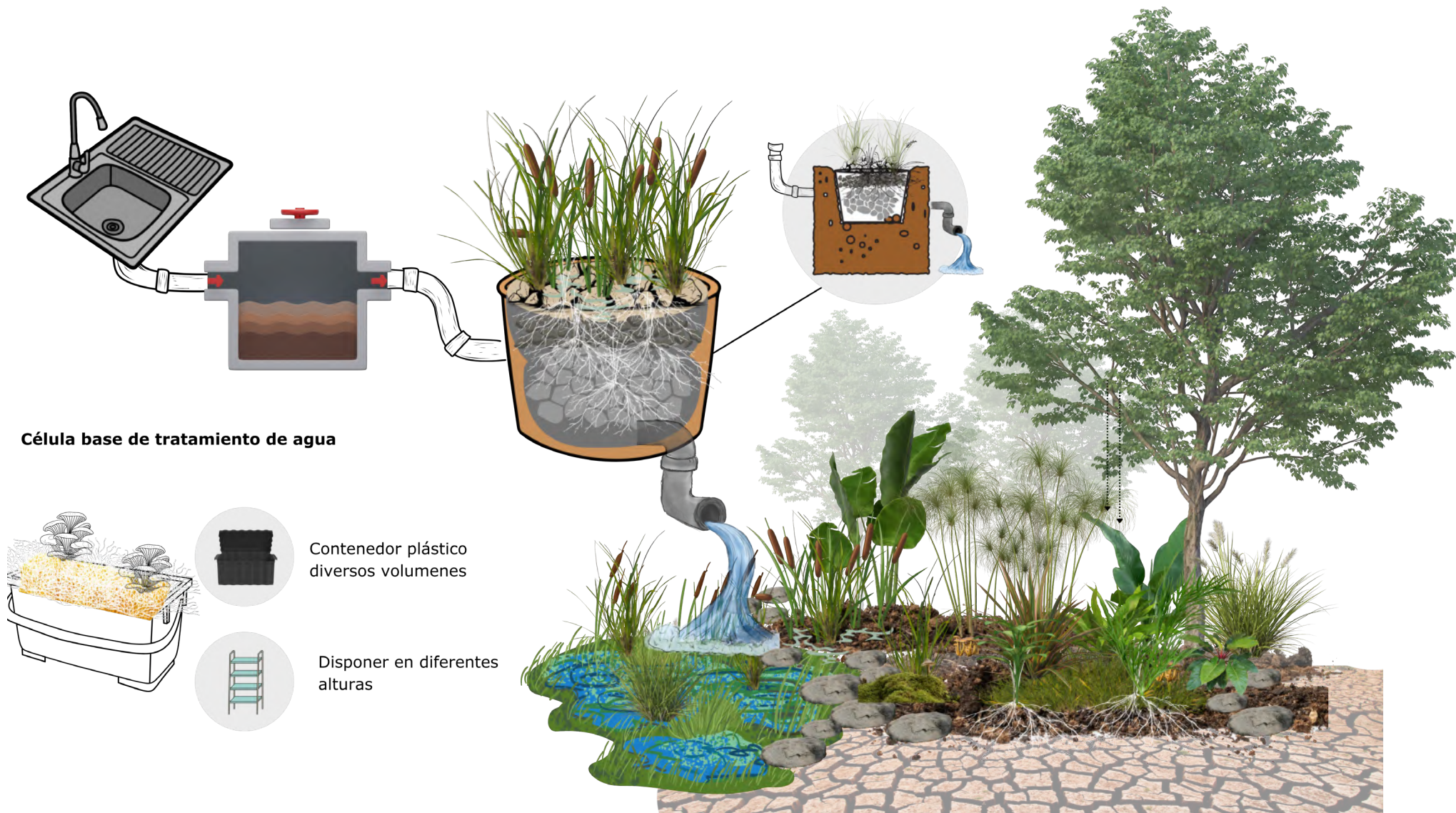


Figura 102. Células contenedoras de filtrado recipientes plásticos.

ITSi

Resultados FASE IV Diseño y Aplicaciones

Los resultados obtenidos muestran que el escenario con micelio de *Pleurotus ostreatus* cultivado en sustrato de trigo se posiciona como la estrategia más efectiva para la biorremediación del agua ver en la figura 101 como se compara con los otros filtrados. Este tratamiento alcanzó la mayor reducción en ortofosfato, con un promedio de 65,56 % y una disminución puntual del 90 % entre la primera y la cuarta semana, lo que refleja una alta capacidad de retención de fósforo en sus diferentes formas. Aunque otros sustratos como la avena y el coco también evidenciaron reducciones importantes en determinados parámetros, el trigo mostró mayor consistencia en la disminución de contaminantes, consolidándose como la alternativa más eficaz dentro de los sistemas vivos evaluados. Estos hallazgos sugieren que la fibra de trigo, en combinación con el micelio de *Pleurotus ostreatus*, ofrece un entorno óptimo para potenciar los procesos de filtración y depuración del agua en microcosmos experimentales.

Los hallazgos obtenidos muestran que la disposición y el ensamble de las piezas del biofiltro, bajo parámetros específicos, permitieron establecer redes radiales de

llenos y vacíos que facilitaron la integración de especies vegetales hidrófitas con potencial de biorremediación. Esta configuración posibilitó la iteración modular de diversos bloques de filtrado, cuidando que los patrones de disposición no cubrieran en su totalidad los cuerpos de agua, ya que ello podría favorecer la proliferación no deseada de especies vegetales. En la figura 102 se observa la colocación horizontal de los bloques de micelio de filtrado, así como las dimensiones y proporciones de cada módulo. Asimismo, se integró el análisis del rendimiento del material en relación con la cantidad de micelio implementado en cada bloque, lo que permitió establecer la correspondencia entre la proporción de biomasa fúngica y la capacidad del biofiltro para degradar contaminantes. De manera destacada, el escenario experimental con micelio de *Pleurotus ostreatus* cultivado en sustrato de trigo se consolidó como la estrategia más efectiva para la biorremediación del agua. Este tratamiento alcanzó una reducción promedio del 65,56 % en ortofosfatos y una disminución puntual de hasta el 90 % entre la primera y la cuarta semana, evidenciando una alta capacidad de retención de fósforo en sus diferentes formas. Si bien otros sustratos como la avena y la fibra de coco mostraron reducciones relevantes en determinados parámetros, el trigo presentó mayor consistencia en la disminución de contaminantes, consolidándose como la alternativa más eficiente dentro de los sistemas vivos evaluados. Estos hallazgos sugieren que la fibra de trigo, en combinación con el micelio de *Pleurotus ostreatus*, genera un entorno óptimo para potenciar los procesos de filtración y depuración del agua en microcosmos experimentales, aportando al diseño y desarrollo de biofiltros de micelio aplicables al tratamiento y saneamiento de cuerpos de agua

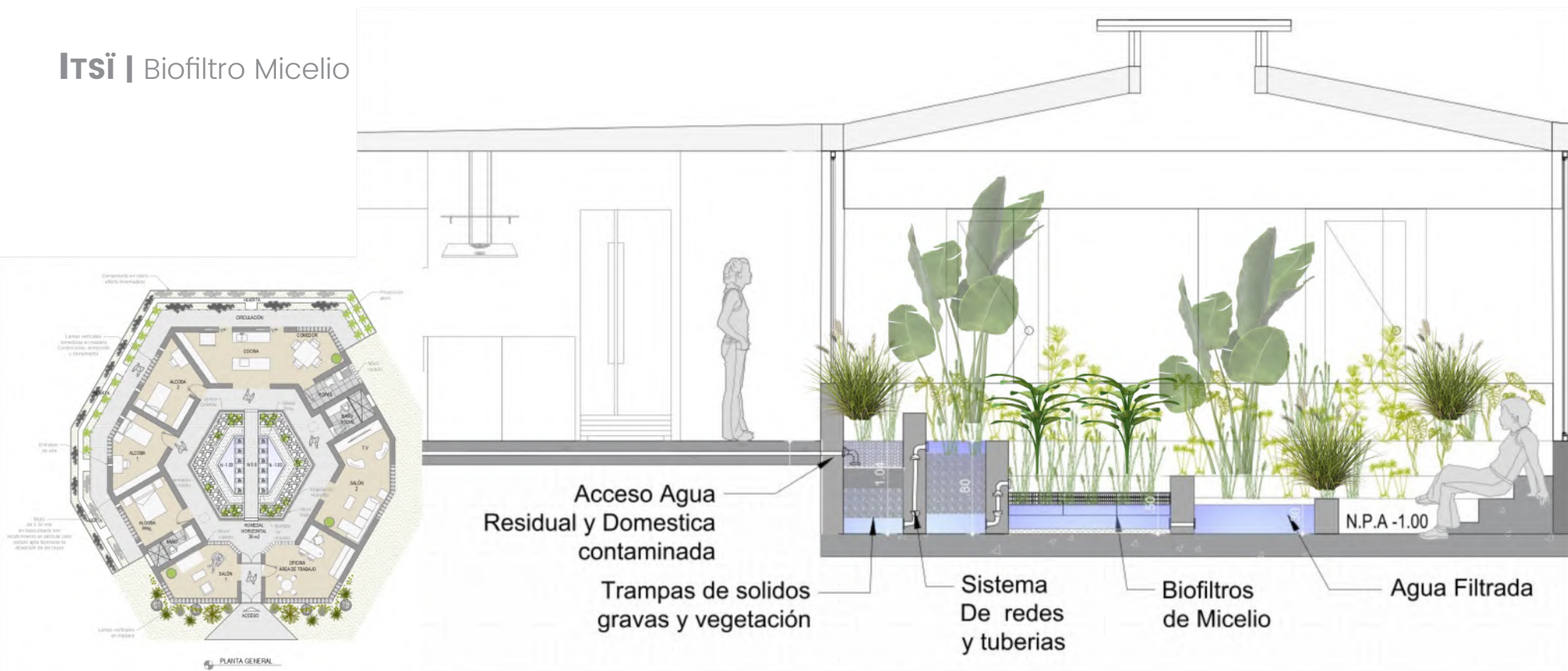
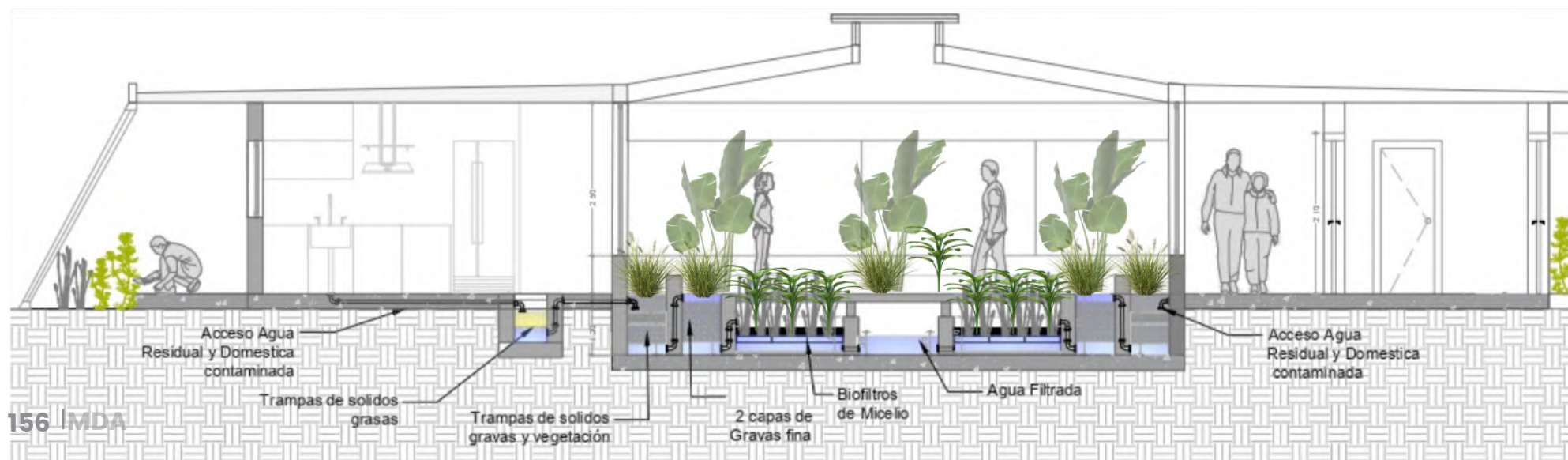


Figura 103. Sección detalle humedal red de abasto Casa domestica peri urbana



Se demuestra que la implementación del biofiltro de micelio en un sistema vivo de tratamiento, estructurado en escala de “células filtradoras”, favorece la renovación progresiva de las condiciones del agua. La disposición de módulos de micelio dentro de etapas secuenciales permitió adaptar filtros convencionales a un esquema biorremediador, integrando procesos de retención y degradación de contaminantes mediante la actividad fúngica. Esta transición hacia etapas con micelio posibilitó una mayor estabilidad en la depuración, dado que las estructuras vivas mostraron un comportamiento dinámico en la captura de nutrientes, metales y fósforo, evitando la saturación temprana de los materiales. En este sentido, el diseño celular de filtración no solo favoreció la iteración de bloques con micelio de distintas dimensiones, sino que también optimizó la capacidad de flujo y contacto superficial del agua con los sustratos activos, incrementando la eficiencia del sistema respecto a filtros inertes.

De manera específica, se constató la relevancia del tipo de sustrato en el rendimiento del micelio y en la eficiencia del biofiltro. El cultivo de *Pleurotus ostreatus* en sustrato de trigo presentó la mayor consistencia en la reducción de contaminantes, alcanzando una remoción de ortofosfatos promedio del 65,56 % y picos de hasta el 90 % en cuatro semanas, lo que lo posiciona como el material más adecuado dentro de los sistemas vivos evaluados. Aunque los sustratos de avena y fibra de coco evidenciaron también procesos de depuración relevantes, su desempeño fue más irregular y dependiente de la etapa experimental. Estos resultados confirman que la selección del sustrato es un factor crítico en el diseño de biofiltros de micelio, pues

determina tanto la viabilidad del crecimiento fúngico como la capacidad de degradación de contaminantes. Asimismo, la interacción entre la fibra vegetal y el micelio potencia la estabilidad estructural del material filtrante, lo que sugiere un campo de aplicación amplio para sistemas híbridos que combinen materiales biodegradables y células vivas en el tratamiento de agua.

El diseño del biofiltro de micelio, basado en la disposición modular de bloques y en la configuración de células filtradoras, Ver figura 102 en don ese ilustra la estructuración de redes radiales con zonas de llenos y vacíos no solo facilita la integración de vegetación biorremediadora, sino que también optimiza la circulación del agua y evita la saturación de los módulos. Este diseño experimental permitió iterar diferentes configuraciones de bloques, evaluar la relación entre el volumen de micelio y la eficiencia de depuración, y establecer criterios de escalabilidad para la implementación en sistemas domésticos o periurbanos. La adaptabilidad del diseño, combinada con la selección adecuada de sustratos, potencia la capacidad del biofiltro para retener y degradar contaminantes, consolidando la relevancia del enfoque de sistemas vivos en el tratamiento de aguas.

Los hallazgos obtenidos confirman la eficacia del diseño propuesto, mostrando que el micelio de *Pleurotus ostreatus* cultivado en sustrato de trigo alcanza la mayor consistencia en la reducción de contaminantes, especialmente ortofosfatos, con una remoción promedio del 65,56 % y picos de hasta 90 % en cuatro semanas. Estos resultados evidencian que la combinación de un diseño estructural eficiente con materiales biológicos adecuados potencia la funcionalidad del biofiltro, al mismo tiempo que establece



Figura 104. Imaginarios y detalle humedal red de abasto Casa domestica peri urbana

bases para su escalabilidad y replicabilidad. Así, el proyecto de investigación no solo valida el uso de sistemas vivos para la depuración del agua, sino que también demuestra cómo un enfoque de diseño integral puede maximizar los beneficios ecológicos y funcionales del biofiltro, generando soluciones innovadoras para el saneamiento descentralizado y sostenible en contextos domésticos y periurbanos.

Este estudio sugieren que los biofiltros de micelio, particularmente aquellos basados en *Pleurotus ostreatus* cultivado en sustrato de trigo, pueden integrarse de manera efectiva en sistemas domésticos de tratamiento de aguas residuales o contaminadas. La modularidad y adaptabilidad de los bloques filtrantes permite su incorporación en filtros convencionales de hogares, generando un sistema híbrido que combina procesos físicos de retención con la capacidad biorremediadora de los hongos. Este enfoque posibilita la creación de sistemas de saneamiento periurbano escalables, donde cada vivienda con acceso a espacios verdes o abiertos puede contribuir a la depuración del agua de manera descentralizada. Además, la implementación doméstica de micelio no solo ofrece beneficios en la reducción de nutrientes y contaminantes, sino que también fomenta la educación ambiental y la participación comunitaria, al permitir que los usuarios interactúen directamente con un sistema vivo que potencia la regeneración de recursos hídricos locales.

Los humedales domésticos horizontales pueden construirse utilizando diversas estrategias que se adaptan a las condiciones del espacio y a los objetivos de tratamiento. Los lechos de grava y arena constituyen la estructura tradicional,

empleando capas de material granular como soporte para la vegetación y la colonización microbiana, destacándose por su simplicidad y bajo costo. Por otra parte, los lechos con sustrato orgánico o compostado incorporan materiales como fibra de coco, aserrín o residuos vegetales, lo que potencia la actividad microbiana y proporciona soporte adicional para el desarrollo de hongos y bacterias. Los sistemas híbridos combinan lechos de sustrato orgánico con grava o integran módulos con micelio, creando un entorno mixto donde coexisten procesos físicos de filtración y biorremediación avanzada. Finalmente, las estructuras prefabricadas o modulares, construidas con concreto, plástico o polímeros reciclados, facilitan la adaptación a espacios reducidos, así como la escalabilidad y el mantenimiento del humedal. En todos los casos, estos sistemas se caracterizan por su operación sostenible, bajo consumo energético y mínimo mantenimiento, al tiempo que ofrecen la posibilidad de incorporar tecnologías vivas, como biofiltros de micelio, que potencian la regeneración y purificación del agua en contextos domésticos y periurbanos.

Los resultados proyectuales evidencian que los humedales domésticos horizontales constituyen una estrategia efectiva para la gestión descentralizada de aguas residuales en entornos domésticos y periurbanos. La implementación del pretratamiento mediante decantación permitió reducir la carga de sólidos gruesos y materia suspendida, optimizando la distribución del agua hacia el lecho filtrante. En esta etapa, la combinación de medios granulares y sustratos biológicos favoreció la colonización de microorganismos y la integración de vegetación acuática, generando condiciones propicias para la retención física y la degradación

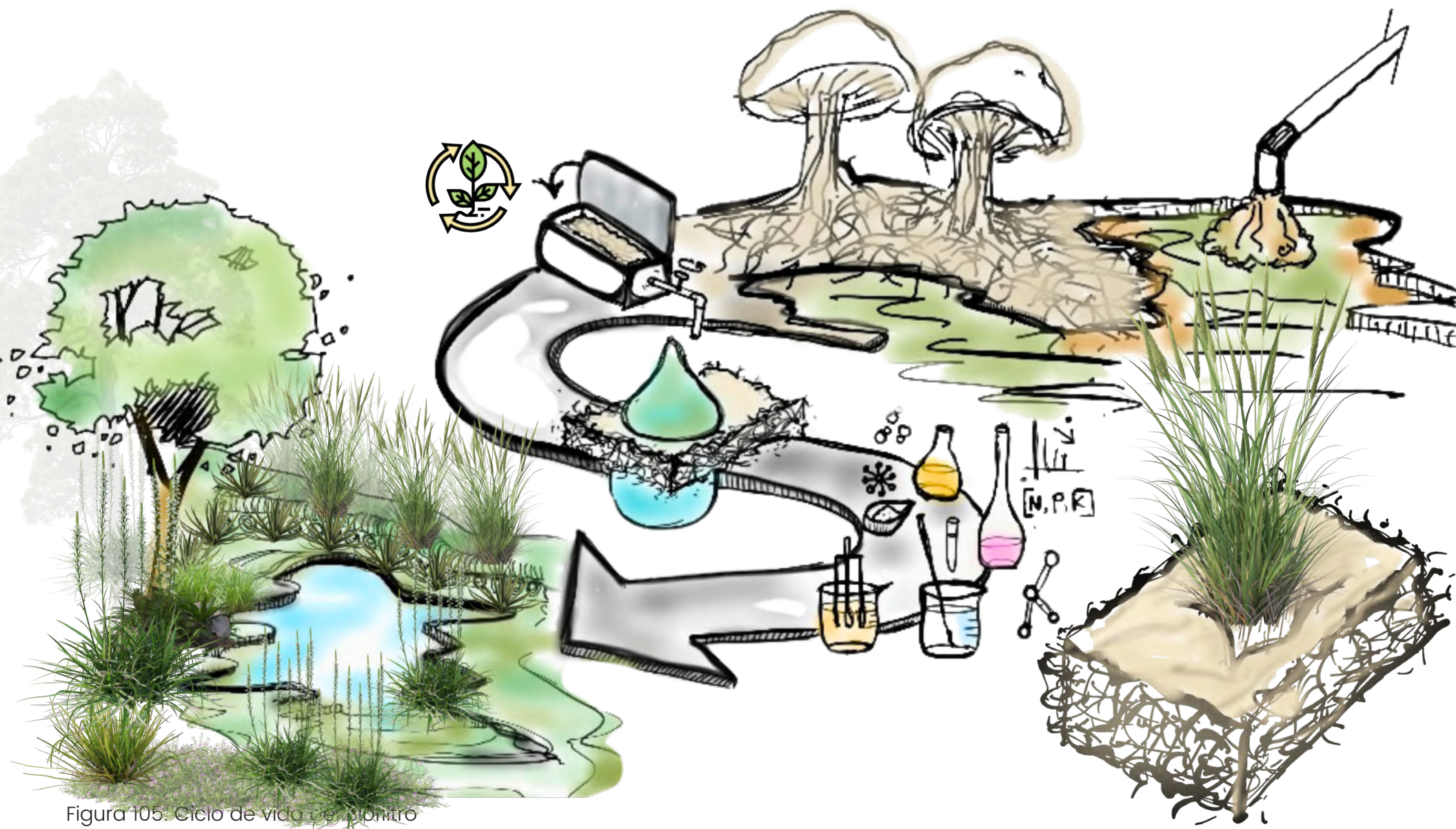


Figura 105. Ciclo de vida del biofiltro

biológica de contaminantes. Durante la fase de filtración y biorremediación, se observó una reducción significativa de nutrientes y materia orgánica, evidenciando la eficacia del sistema para mejorar la calidad del agua. Finalmente, el afluyente de agua tratada mostró características adecuadas para su reutilización en riego, infiltración o descarga segura, demostrando que los humedales domésticos horizontales ofrecen un modelo sostenible y replicable de saneamiento no centralizado que puede aplicarse en viviendas unifamiliares y comunidades periurbanas con disponibilidad de espacios verdes.

Se concluye que la implementación de estrategias de saneamiento no centralizado mediante biofiltros de micelio como membrana de filtrado constituye una alternativa viable y estratégica frente a la creciente escasez de agua a nivel global. La capacidad del micelio para retener y degradar contaminantes posiciona a estos sistemas locales como herramientas efectivas para maximizar la reutilización del recurso hídrico, particularmente en zonas con acceso limitado a agua potable o infraestructura centralizada. Además, este enfoque no solo proporciona soluciones inmediatas para el tratamiento doméstico y periurbano, sino que también funciona como una estrategia preventiva frente a escenarios de crisis hídricas y extinción de fuentes de agua dulce, asegurando la disponibilidad mínima de agua segura para la supervivencia de comunidades humanas y la preservación de ecosistemas. En este sentido, la integración de membranas vivas de micelio en sistemas descentralizados representa un modelo de resiliencia hídrica que combina innovación biotecnológica con gestión sostenible de recursos, consolidando al saneamiento no

centralizado como un componente clave para la adaptación climática y la seguridad hídrica global.

Ver la figura 105 en donde se ilustra el **ciclo de vida del proyecto** se centra en la utilización de hongos como estrategia de biorremediación de las condiciones del agua, integrando un enfoque de diseño regenerativo que articula sostenibilidad, reutilización de recursos y creación de prototipos funcionales. Inicialmente, se seleccionan y cultivan especies de hongos con potencial para degradar y retener nutrientes y contaminantes específicos, como nitrógeno, fósforo y potasio. Estas especies se incorporan en diferentes moldes y sistemas de filtración, donde permanecen por tiempos determinados que permiten la interacción óptima entre el micelio y los iones presentes en el agua. Durante este proceso, se monitorean las reacciones químicas y biológicas generadas por el micelio, cuantificando los porcentajes de reducción de contaminantes y evaluando la eficiencia de la depuración. El agua filtrada, una vez tratada, se puede reutilizar en zonas de riego, tareas domésticas de lavado o en infiltración segura, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico. Paralelamente, el material de micelio agotado mantiene valor como insumo para compostaje o integración en jardines, cerrando el ciclo de vida del sistema y promoviendo la regeneración de los suelos y ecosistemas locales. Esta articulación de procesos biológicos, mediciones químicas y principios de diseño regenerativo permite no solo la depuración del agua, sino también la creación de prototipos replicables que incorporan sostenibilidad, eficiencia y funcionalidad, ofreciendo una alternativa innovadora de saneamiento descentralizado con impacto ambiental positivo



Figura 106. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables

ITSi

Discusión, Biofiltro de Micelio en Futuros provables

La integración de biofiltros de micelio en el marco de la biorremediación hídrica se presenta como una estrategia innovadora capaz de responder a escenarios de creciente irregularidad en la gestión de agua, particularmente en territorios donde la presión climática ya ha puesto en riesgo la disponibilidad de recursos hídricos. El uso de especies de hongos como *Pleurotus* spp. en sistemas vivos de filtración no solo permite depurar contaminantes, sino que abre la posibilidad de cultivar organismos fúngicos como recurso alimentario, configurando soluciones multifuncionales ante la crisis hídrica y alimentaria. Desde una perspectiva epistemológica, la aplicación de estos sistemas redefine la generación de conocimiento al situar a los hongos como agentes de aprendizaje y práctica regenerativa, transformando el entendimiento científico en una herramienta de acción directa para la resiliencia social y ambiental.

En escenarios distópicos derivados del cambio climático, donde la humanidad enfrenta escasez de agua, alimentos y servicios básicos, los biofiltros de micelio emergen como una tecnología descentralizada de bajo costo, adaptable a diversas escalas y condiciones ambientales. La implementación de estos sistemas podría garantizar agua mínimamente segura para consumo humano y uso agrícola, al tiempo que favorece la producción de hongos comestibles como fuente alternativa de nutrientes. Epistemológicamente, estas iniciativas plantean un cambio en el paradigma de la infraestructura: de modelos centralizados y extractivos hacia sistemas vivos, simbióticos y adaptativos que se conciben no solo como tecnologías de supervivencia, sino como mediaciones de conocimiento que reconcilian la relación entre naturaleza y sociedad.

Las implicaciones de aplicar proyectos de esta naturaleza van más allá de lo técnico y operativo, ya que se sitúan en el campo del diseño regenerativo como una herramienta que articula innovación biotecnológica con principios éticos y ecológicos. A futuro, la consolidación de biofiltros de micelio como objetos útiles para la regeneración de ecosistemas acuáticos no solo contribuirá a mitigar los efectos de la escasez de agua, sino que abrirá horizontes para replantear la relación entre humanidad y naturaleza. La postura epistemológica aquí derivada sostiene que la investigación en biotecnología ambiental debe concebirse como un proceso abierto, relacional y coevolutivo, donde el conocimiento no se limita a describir fenómenos, sino que se convierte en práctica transformadora capaz de incidir en escenarios de crisis y garantizar la sostenibilidad de los recursos básicos para la vida.



Figura 107. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables



Figura 108. Discusión biofiltro de micelio, Futuros probables

ITSi

Post-Racionalización Biofiltro de Micelio

La integración de biofiltros de micelio en el marco de la biorremediación hídrica se presenta como una estrategia emergente y transformadora frente a los desafíos contemporáneos de la crisis ambiental. En un contexto donde la gestión del agua se ve amenazada por la irregularidad climática y la degradación de los ecosistemas, el uso de especies fúngicas como *Pleurotus* spp. ofrece una doble función ecológica y social: depurar contaminantes y producir organismos comestibles. Esta doble condición convierte al micelio en un agente de transición entre las necesidades humanas y las dinámicas naturales, situando al diseño como una práctica regenerativa capaz de responder simultáneamente a las crisis hídrica y alimentaria. Desde esta perspectiva, el conocimiento generado no se limita al laboratorio o al campo técnico, sino que se expande hacia una dimensión epistemológica que reconoce a los hongos como agentes de aprendizaje y práctica ecológica, transformando la investigación científica en una acción de resiliencia colectiva.

En escenarios de escasez extrema derivados del cambio climático, los biofiltros de micelio emergen como tecnologías vivas descentralizadas, accesibles y adaptables a diferentes escalas y contextos. Su implementación en comunidades vulnerables puede asegurar agua tratada para consumo

y riego, al tiempo que genera alimentos y materiales biodegradables. Esta multifuncionalidad revela una transición epistemológica: la sustitución de infraestructuras rígidas y extractivas por sistemas simbióticos, flexibles y coevolutivos. Tal como señalan autores como Latour (2017) y Fry (2012), el diseño debe entenderse como una práctica ontológica, capaz de dar forma a modos de existencia que reconcilien lo humano y natural. En este sentido, los biofiltros de micelio no sólo actúan como dispositivos ecológicos, sino como mediaciones de conocimiento que rearticulan la relación entre cultura, tecnología y biosfera.

El desarrollo de estos sistemas se sitúa en el campo del diseño regenerativo, donde la innovación biotecnológica se entrelaza con principios éticos y ecológicos. Mang y Reed (2012) plantean que diseñar regenerativamente implica aumentar la capacidad evolutiva de los sistemas vivos, más que limitar el impacto humano. Así, los biofiltros de micelio pueden considerarse interfaces de restauración ecológica, capaces de devolver a los cuerpos de agua su vitalidad perdida. Este tipo de proyectos trasciende la sostenibilidad, que busca mitigar daños, para situarse en la regeneración, que restituye la agencia de lo vivo. De este modo, el diseño se redefine como proceso de acompañamiento y cuidado, donde el diseñador coevoluciona junto a los organismos con los que colabora.

Desde esta mirada, el diseño avanzado asume un rol mediador en las dinámicas planetarias, integrando biología, tecnología, ética y cultura para abordar las urgencias del presente. Haraway (2016) y Tsing (2015) invitan a “permanecer con el problema”, es decir, a convivir con

la incertidumbre y a aprender de las interdependencias que sostienen la vida. Bajo este principio, el biofiltro de micelio se configura como una diplomacia interespecie, en la que el micelio, las bacterias, el agua y el ser humano cohabitan en procesos de mutua regeneración. **El diseñador, más que creador, se convierte en cuidador y aprendiz,** reconociendo que la innovación no surge de la dominación de la naturaleza, sino del diálogo con sus inteligencias materiales. Esta transformación epistemológica resitúa al diseño como una práctica relacional, que busca reparar las fracturas entre lo natural y lo humano a través de infraestructuras vivas y sensibles.

Finalmente, los biofiltros de micelio revelan el potencial del diseño como práctica de justicia ecológica. En un mundo donde los sistemas de producción y desecho han silenciado a innumerables seres sin voz, microorganismos, hongos, peces, plantas acuáticas, el acto de diseñar con lo vivo se convierte en un gesto político y ético. No se trata de hablar por ellos, sino de crear condiciones materiales donde su agencia se manifieste y su vitalidad se restablezca. Así, el diseño deja de ser una herramienta de intervención humana sobre el entorno para convertirse en un proceso de coevolución con la Tierra, donde cada proyecto es una oportunidad para restaurar vínculos, regenerar ecosistemas y reimaginar el futuro desde la interdependencia. Diseñar con micelio, en este marco, es aprender a vivir de nuevo: aprender a co-diseñar con la vida para sostener los flujos vitales del planeta.

El proceso de investigación y desarrollo de los biofiltros de micelio ha representado un ejercicio profundo de diálogo entre la materia viva, el pensamiento de diseño y la

práctica ecológica. Trabajar con organismos fúngicos me llevó a reconocer que el diseño, lejos de ser una actividad de control o invención, puede devenir en una forma de escucha y acompañamiento de los procesos naturales. A lo largo del proyecto, comprendí que el micelio no es solo un material con propiedades funcionales, sino un agente vivo de aprendizaje, capaz de revelar dinámicas de colaboración, resiliencia y adaptación que resultan esenciales para imaginar futuros más sostenibles. Esta experiencia transformó mi comprensión del diseño como disciplina, llevándome a entenderlo como un medio para restaurar relaciones y no únicamente para resolver problemas.

La observación del comportamiento del micelio frente a distintos entornos su respuesta ante la humedad, los contaminantes o las condiciones del sustrato permitió evidenciar que el conocimiento no se construye únicamente desde la razón técnica, sino desde la interacción empírica, sensible y simbiótica con lo vivo. En este sentido, el laboratorio se convirtió en un espacio de cohabitación donde las fronteras entre diseñadora e investigador se desdibujaron para dar paso a una ecología del aprendizaje. El micelio enseñó que la regeneración no se impone: se cultiva. Cada etapa de crecimiento, cada transformación del material, fue una lección sobre la temporalidad, la interdependencia y la importancia de ceder control en favor de la cooperación con la naturaleza.

Desde la perspectiva epistemológica, este proceso evidenció que el conocimiento en el campo del diseño no puede seguir siendo exclusivamente antropocéntrico. Los biofiltros de micelio desafiaron los límites entre sujeto y

objeto, entre diseño y biología, invitando a repensar la práctica como un acto coevolutivo donde lo humano no es el centro, sino una parte más del entramado vital. En este contexto, el diseño se vuelve un lenguaje común entre especies, un medio que posibilita la mediación entre lo visible y lo invisible, entre las necesidades humanas y las lógicas ecológicas. Este desplazamiento del rol del diseñador hacia una figura de mediador o cuidador implica una transformación ética: reconocer la agencia de los seres sin voz humana y permitir que sus formas de existencia orienten nuestras decisiones creativas.

Aprender de los sistemas vivos implicó también asumir la incertidumbre como parte constitutiva del proceso. El comportamiento del micelio nunca fue totalmente predecible; su crecimiento dependió de condiciones ambientales que escapaban al control total del experimento. Este carácter incierto enseñó la importancia de diseñar desde la adaptabilidad, de aceptar la vida como variable activa dentro del sistema de diseño. En lugar de buscar la precisión absoluta, la práctica se orientó hacia la observación paciente, el registro continuo y la interpretación de los cambios sutiles. Este aprendizaje resultó fundamental para comprender que el diseño regenerativo no busca imponer soluciones definitivas, sino habilitar condiciones para que los ecosistemas recuperen su capacidad de autorregulación.

Asumir el desarrollo de un biofiltro de micelio como eje de investigación no ha sido únicamente una decisión técnica o experimental, sino una postura filosófica frente al diseño y su papel en el mundo contemporáneo. Este proyecto emerge del reconocimiento de que el diseño no puede

seguir siendo entendido como una práctica instrumental, orientada a la eficiencia o a la producción de objetos útiles, sino como un acto ontológico (Fry, 2012; Latour, 2017): una forma de dar existencia, de reconfigurar relaciones entre seres y de mediar entre lo humano y natural. En esta perspectiva, diseñar con sistemas vivos y no simplemente sobre ellos implica desplazar el centro del pensamiento creativo desde la mente del diseñador hacia las inteligencias distribuidas de la naturaleza.

La incorporación del micelio como agente activo en el proceso de diseño supuso un cambio profundo en mi forma de pensar y de actuar. Tradicionalmente, el diseño se ha definido por su capacidad de control, predicción y dominio material; sin embargo, trabajar con organismos vivos desafía esas nociones al introducir la incertidumbre, la temporalidad y la autonomía de lo biológico. Esta experiencia me condujo a comprender que el acto de diseñar es, ante todo, un acto de humildad: aprender a ceder, a escuchar y a permitir que la vida misma dicte el rumbo del proceso. Tal como sugiere Haraway (2016), “vivir y pensar con lo vivo” requiere permanecer con el problema, aceptar la complejidad y renunciar a las jerarquías antropocéntricas que históricamente han definido nuestra relación con el entorno.

Desde esta perspectiva, el sistema vivo se convierte en el principal material de análisis, no porque sea objeto de estudio, sino porque constituye un sujeto relacional que co-construye el conocimiento. En la práctica con micelio, cada observación sobre su crecimiento, su capacidad de regenerar el agua o de colonizar nuevos materiales, se tradujo en un diálogo que rebasó la frontera disciplinar entre ciencia y

diseño. Esta interacción puso en evidencia la necesidad de una epistemología del “saber con” (Ingold, 2013), donde el aprendizaje se produce en la acción, en la atención y en la presencia con lo vivo. Así, el diseño se reconfigura como una práctica eco-filosófica, en la que el pensamiento surge de la materia, y la materia, a su vez, se convierte en pensamiento.

La filosofía detrás de este proyecto se sustenta en la convicción de que los sistemas vivos son portadores de conocimiento, y que el papel del diseño debe ser el de revelar, amplificar y aprender de esas formas de sabiduría natural. El micelio, con su estructura reticular y su comportamiento rizomático, encarna una lógica de interdependencia que contrasta con la fragmentación del pensamiento moderno. Observar su modo de operar es observar un modelo de mundo donde la colaboración reemplaza a la competencia, y donde la resiliencia nace de la conexión entre múltiples agentes. En este sentido, diseñar biofiltros de micelio no es un gesto utilitario, sino un acto filosófico-político que cuestiona las bases extractivas del conocimiento y propone una ética del cuidado como principio rector del diseño.

Asumir el micelio como maestro transforma también la noción de autoría. En lugar de pensar al diseñador como creador, se lo entiende como mediador y cuidador de procesos. Esta postura, cercana a la ecología profunda (Naess, 1989) y al pensamiento de la simpoiesis (Haraway, 2016), concibe la creación como un acto compartido entre especies. Implementar sistemas vivos significa abrir el diseño a la posibilidad de que otros hongos, bacterias, plantas, agua, participen activamente en la configuración de la forma y la función. Este gesto redefine el acto

creativo como un proceso evolutivo, donde la intención humana se entrelaza con las dinámicas ecológicas y donde el resultado es siempre provisional, cambiante, vivo.

En términos ontológicos, el proyecto plantea que el diseño es un modo de existencia en conexión con la Tierra. La práctica se convierte en una manera de pensar con las manos, de razonar a través de la materia y de producir conocimiento sensible que responda a las urgencias planetarias. Implementar sistemas vivos como materia de análisis no solo amplía el horizonte del diseño hacia lo biotecnológico, sino que también invita a reconstruir su sentido ético y espiritual. Trabajar con el micelio me llevó a reconocer la dimensión sagrada de la vida: su capacidad de regenerar, de sostener y de enseñar sin palabras. Este reconocimiento no es sentimental, sino político; implica comprender que el diseño puede ser una herramienta para restituir justicia ecológica, para reparar las relaciones fracturadas entre los humanos y los ecosistemas.

En síntesis, mi postura filosófica como diseñadora se basa en la convicción de que el futuro del diseño reside en aprender a **conectarme con la vida**. Esto significa dejar atrás el paradigma de la sostenibilidad como mitigación, y **avanzar hacia la regeneración como principio ontológico**. Significa también asumir que todo **acto de diseño** tiene consecuencias ecológicas, y que cada decisión material, formal o conceptual es una toma de posición frente al destino de los sistemas que sostienen la vida. Los biofiltros de micelio, más que una tecnología, son una práctica de pensamiento encarnado, **una metáfora viva de lo que significa diseñar en colaboración con los procesos de la Tierra**.

ITSi

Biofiltro Micelio

Capítulo 5, Contiene los apéndices de “**Reflexiones finales**”, aprendizaje para desarrollos futuros, proyección del proyecto y anexos de ejecución del proyecto.



Obi

ITSi

Reflexiones Finales

La Optimización y adaptabilidad del micelio de *Pleurotus* spp.: El crecimiento y desempeño del micelio dependen críticamente de las condiciones de humedad, temperatura, oscuridad y del tipo de sustrato utilizado, destacando el coco y el trigo por su rápida colonización y eficiencia como biofiltros. Estos hallazgos demuestran que la manipulación controlada de variables ambientales y de sustrato permite maximizar la proliferación del micelio, asegurando resultados reproducibles y escalables para aplicaciones en biotecnología y restauración ambiental.

Aplicaciones ambientales y educativas del micelio: El micelio de *Pleurotus ostreatus* se confirma como un agente biológico viable para la biofiltración de agua y la creación de sistemas sostenibles de regeneración de ecosistemas. Además, su uso en materiales biocompuestos y como herramienta educativa permite integrar la experimentación científica con la concienciación ambiental, evidenciando su potencial para soluciones innovadoras en educación, tecnología y restauración ecológica.

La eficiencia del proceso de filtración de agua depende del tipo de sustrato utilizado para el cultivo del micelio, como trigo, avena o coco, debido a sus diferencias en fibra, porosidad y retención de humedad. Durante los primeros 20 días, las hifas se expanden formando una red densa que mejora la retención y degradación de contaminantes. La elección del sustrato influye en la velocidad de colonización, la estabilidad del biofiltro y su capacidad de filtrado, mientras que el tiempo de exposición garantiza un rendimiento óptimo. Este enfoque adaptable permite diseñar sistemas de biofiltración efectivos para aplicaciones domésticas y

proyectos de restauración ambiental.

El crecimiento de materia orgánica en los sistemas de filtración evidencia cambios en la polarización iónica y una disminución de la conductividad del agua. Cada tipo de fibra genera efectos distintos sobre la eficiencia del filtrado, destacando el micelio cultivado en trigo como la estrategia más eficaz. La efectividad del biomaterial depende de factores como el tiempo de exposición, la densidad de hongo y el tipo de sustrato empleado, lo que resalta la importancia de optimizar estas variables para maximizar la capacidad de purificación del agua.

La implementación de estrategias de saneamiento no centralizado mediante biofiltros de micelio como membranas filtrantes constituye una alternativa viable y estratégica frente a la creciente escasez de agua a nivel global. La capacidad del micelio para retener y degradar contaminantes posiciona a estos sistemas locales como herramientas efectivas para optimizar la reutilización del recurso hídrico, especialmente en zonas con acceso limitado a agua potable o infraestructura centralizada. Este enfoque no solo ofrece soluciones inmediatas para el tratamiento doméstico y periurbano, sino que también actúa como medida preventiva ante crisis hídricas y la pérdida de fuentes de agua dulce, asegurando la disponibilidad mínima de agua segura para comunidades humanas y la conservación de ecosistemas. En este marco, la integración de membranas vivas de micelio en sistemas descentralizados representa un modelo de resiliencia hídrica que combina innovación biotecnológica con gestión sostenible de recursos, consolidando al saneamiento no

centralizado como un componente clave para la adaptación climática y la seguridad hídrica global.

En conclusión, los biofiltros de micelio representan una estrategia que trasciende lo técnico para integrarse en el campo del diseño regenerativo, articulando innovación biotecnológica con principios éticos y ecológicos orientados a la restauración de ecosistemas acuáticos. Su consolidación no solo ofrece una respuesta efectiva frente a la escasez de agua, sino que también plantea la necesidad de replantear la relación entre humanidad y naturaleza desde una perspectiva epistemológica abierta y coevolutiva. De este modo, la investigación en biotecnología ambiental se configura como una práctica transformadora capaz de generar resiliencia en escenarios de crisis y de garantizar la sostenibilidad de los recursos esenciales para la vida.

Finalmente, el proyecto de biofiltro de micelio plantea un aporte filosófico al campo del diseño al concebirlo como una práctica ontológica y relacional, donde la vida se reconoce como agente creador. Al trabajar con organismos vivos, el diseño se transforma en un acto de mediación y cuidado, capaz de generar conocimiento desde la colaboración y no desde el control. Este enfoque redefine la innovación como proceso de coevolución entre humanos y ecosistemas, proponiendo una ética regenerativa que une ciencia, filosofía y sensibilidad ecológica. En última instancia, el biofiltro de micelio simboliza la posibilidad de diseñar con la vida para restaurar los flujos vitales del planeta, consolidando al diseño como herramienta de justicia ecológica y reconexión con la Tierra.

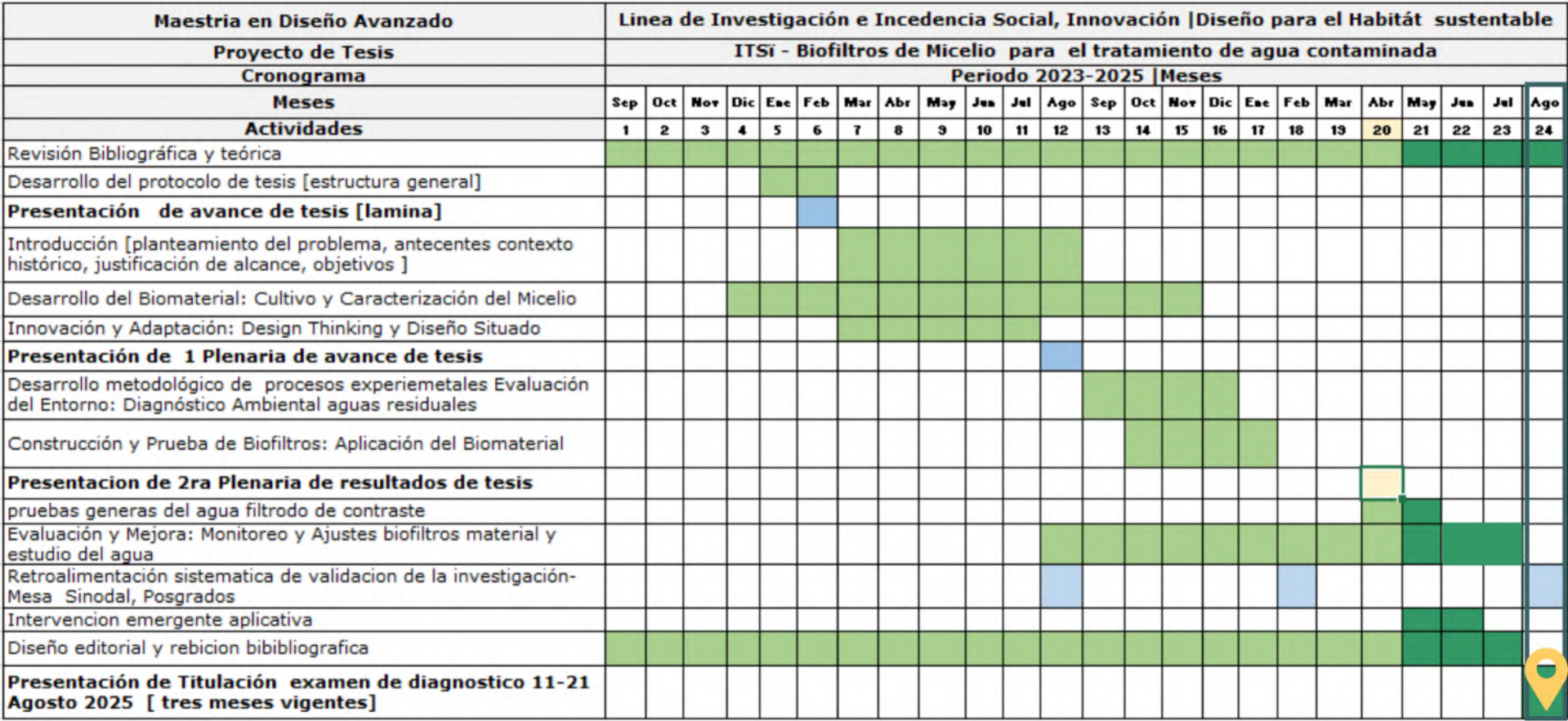


Figura 109. Cronograma de Actividades

ITSi

Referencias Bibliográficas

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23^a ed.). American Public Health Association.

Arya, A., Arya, C., & Dhar, P. (2020). Use of fast growing white wood rotting fungus *Ganoderma lucidum* (L.) Karst. for cultural and bioremediation studies. *Environment at crossroads* by A. Arya Scientific Pub. India, 1-9.

APPADURAI, Arjun, La modernidad desbordada. Dimensiones culturales de la globalización, Montevideo y Buenos Aires, Trilce y FCE, 2001 pp. 25-44

Atilano Camino, M. M. (2017). Producción de enzimas ligninolíticas en un reactor Airlift y evaluación de su uso en el tratamiento de aguas azules (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León)

Biermann, F. (2018). Gobernanza global en el "antropoceno". *The Oxford Handbook of International Political Theory*, 467.

Bibbins-Martínez, M., Juárez-Hernández, J., López-Domínguez, J. Y., Nava-Galicia, S. B., Martínez-Tozcano, L. J., Juárez-Atonal, R., ... & Díaz-Godínez, G. (2023). Potential application of fungal biosorption and/or bioaccumulation for the bioremediation of wastewater contamination: A review. *Journal of Environmental Biology*, 44(2), 135-145.

Bitton, G. (2010). *Wastewater Microbiology* (4th ed.). Wiley-Blackwell.

Bleecker, J. (2009). Design fiction: A short essay on design, science, fact, and fiction. *Design Fiction Journal*, 7(3), 10-19. <https://doi.org/10.1080/14606925.2009.1059110>

Brandsen, T., & Honingh, M. (2016). Co-design in public sector

services: A critical review of the literature. *Journal of Co-Design Studies*, 8(2), 50-65. <https://doi.org/10.1080/14606925.2016.1150508>

Brichetti, J. P., Mastronardi, L., Rivas, M. E., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021). La brecha de infraestructura en América Latina y el Caribe: estimación de las necesidades de inversión hasta 2030 para progresar hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0003759>

Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), 84-92.

Brown, T. (2022). Understanding biochemical oxygen demand (BOD) and its role in wastewater treatment. *Water Quality Online*. <https://www.waterqualityonline.com/biochemical-oxygen-demand-bod>

Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>

Carmona Carrera, E. D. M. (2023). Biorrestauración de un suelo contaminado con diésel mediante composteo con residuos de champiñón común (*Agaricus bisporus*) y cáscaras de plátano (*Musa sp.*). <https://doi.org/10.24275/uama.379.10407>.

CAPDEVILA-WERNING, Remei, Goodman for Architects, Londres y Nueva York, Routledge, 2014, pp. 9-30.

Chen, X., Chen, J., Liu, X., & Zhang, W. (2020). Degradation of organic pollutants by *Lentinula edodes* and its application in bioremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 19112-19122.

Choudhury, S., & Chatterjee, A. (2022). Microbial application in remediation of heavy metals: an overview. *Archives of microbiology*, 204(5), 268.

CONAGUA. (2023). Informe de la calidad del APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23ª ed.). American Public Health Association.

Arya, A., Arya, C., & Dhar, P. (2020). Use of fast growing white wood rotting fungus *Ganoderma lucidum* (L.) Karst. for cultural and bioremediation studies. *Environment at crossroads* by A. Arya Scientific Pub. India, 1-9.

APPADURAI, Arjun, La modernidad desbordada. Dimensiones culturales de la globalización, Montevideo y Buenos Aires, Trilce y FCE, 2001 pp. 25-44

Atilano Camino, M. M. (2017). Producción de enzimas ligninolíticas en un reactor Airlift y evaluación de su uso en el tratamiento de aguas azules (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León)

Biermann, F. (2018). Gobernanza global en el "antropoceno". *The Oxford Handbook of International Political Theory*, 467.

Bibbins-Martínez, M., Juárez-Hernández, J., López-Domínguez, J. Y., Nava-Galicia, S. B., Martínez-Tozcano, L. J., Juárez-Atonal, R., ... & Díaz-Godínez, G. (2023). Potential application of fungal biosorption and/or bioaccumulation for the bioremediation of wastewater contamination: A review. *Journal of Environmental Biology*, 44(2), 135-145.

Bitton, G. (2010). *Wastewater Microbiology* (4th ed.). Wiley-Blackwell.

Bleecker, J. (2009). Design fiction: A short essay on design, science, fact, and fiction. *Design Fiction Journal*, 7(3), 10-19. <https://doi.org/10.1080/14606925.2009.1059110>

Brandsen, T., & Honingh, M. (2016). Co-design in public sector services: A critical review of the literature. *Journal of Co-Design*

Studies, 8(2), 50-65. <https://doi.org/10.1080/14606925.2016.1150508>

Brichetti, J. P., Mastronardi, L., Rivas, M. E., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021). La brecha de infraestructura en América Latina y el Caribe: estimación de las necesidades de inversión hasta 2030 para progresar hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0003759>

Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), 84-92.

Brown, T. (2022). Understanding biochemical oxygen demand (BOD) and its role in wastewater treatment. *Water Quality Online*. <https://www.waterqualityonline.com/biochemical-oxygen-demand-bod>

Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>

Carmona Carrera, E. D. M. (2023). Biorrestauración de un suelo contaminado con diésel mediante composteo con residuos de champiñón común (*Agaricus bisporus*) y cáscaras de plátano (*Musa sp.*). <https://doi.org/10.24275/uama.379.10407>.

CAPDEVILA-WERNING, Remei, Goodman for Architects, Londres y Nueva York, Routledge, 2014, pp. 9-30.

Chen, X., Chen, J., Liu, X., & Zhang, W. (2020). Degradation of organic pollutants by *Lentinula edodes* and its application in bioremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 19112-19122.

- Choudhury, S., & Chatterjee, A. (2022). Microbial application in remediation of heavy metals: an overview. *Archives of microbiology*, 204(5), 268.
- CONAGUA. (2023). Informe de la calidad del agua en México. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua>
- CONAGUA. (2017). Avances en la gestión y tratamiento de aguas residuales en México. Informe Anual de la Comisión Nacional del Agua. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/informe-anual-2017>
- Comisión Nacional del Agua. (2020). Informe Nacional de la Calidad del Agua en México. Recuperado de CONAGUA
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). Estadísticas del agua en México. <https://www.gob.mx/conagua>
- Crutzen, P. J., & Stoermer, E. F. (2000). The "Anthropocene". *Global Change Newsletter*, 41, 17-18.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Cruz, M. (2012). Designing for situated actions: The role of context in the design process. *Journal of Design Research*, 10(3), 239-255.
- Cruz, P., & Vázquez, C. (2015). Diseño situado: Un enfoque interdisciplinar para la resolución de problemas complejos. *Revista de Diseño*, 28(4), 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.revd.2015.05.001>
- Cruz, D. (2012). Design Thinking como herramienta para la resolución de problemas urbanos. *Revista de Innovación y Sostenibilidad Urbana*, 5(3), 25-35. <https://doi.org/10.1234/risu.v5i3.2012>
- Di Pace, M., Caride, H. E., & Herrero, A. C. (2012). Ecología urbana (pp. 376-pp). Los Polvorines: Universidad Nacional de General Sarmiento
- Design Council. (2019). Co-design for community impact: Case studies and best practices. <https://www.designcouncil.org.uk/resources/report/co-design-community-impact>
- Dunne, A., & Raby, F. (2013). *Speculative design: Crafting the speculative and critical* (1ª ed.). MIT Press.
- Escobar, A. (2008). *Territories of difference: Place, movements, life, redes*. Duke University Press. <https://doi.org/10.1215/9780822389439>
- Esrey, S. A., Andersson, I., Hillers, A., & Sawyer, R. (2001). *Closing the loop: Ecological sanitation for food security*. Swedish International Development Cooperation Agency.
- El Orden Mundial. (2020.). El mapa del agua dulce disponible en el mundo. Recuperado de <https://elordenmundial.com/el-mapa-del-agua-dulce-disponible-en-el-mundo>
- FAO. (2015.). AQUASTAT - Sistema mundial de información sobre el agua en la agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/aquastat/es/overview>
- Fewtrell, L., & Kay, D. (2015). *Health impact assessment for sustainable water management*. Earthscan.
- Friedman, T. L. (2005). *La tierra es plana: Breve historia del siglo XXI*. Editorial Planeta.
- Fowler, K. M., & Rauch, E. (2014). *Sustainable building design: Principles and practice*. Routledge
- Fuente, A. (2020). *La construcción con biomateriales: Soluciones sustentables en el desarrollo y aplicaciones urbanas*. Editorial Verde.
- Gadd, G. M. (2001). *Fungi in Bioremediation*. Cambridge University Press.

Galderisi, A. (2014). Urban risk management: New issues and solutions. In *Advances in Spatial Science* (pp. 135-148). Springer. h

Galderisi, A. (2014). Cambiamento Climatico, Rischi e Governo delle Trasformazioni Urbane: quali prospettive per l'integrazione?. *Urbanistica Informazioni*, (257), 50-54.

Gangola, S., Bhatt, P., Joshi, S., Kumar, S., Bhandari, N. S., Terwari, S., ... & Mittal, A. K. (2022). Recent advancements in microbial enzymes and their application in bioremediation of xenobiotic compounds. In *Industrial Applications of Microbial Enzymes* (pp. 41-57). CRC Press.

Garbisu, C., & Alkorta, I. (2001). Phytoextraction: A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 77(3), 229-236. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00108-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00108-5)

García, M. J. (2019). Estrategias de drenaje urbano en Morelia. En J. F. Martínez (Ed.), *Infraestructura urbana en México* (pp. 75-92). Editorial Construcción Verde.

García, M., & Bardossy, A. (2009). Urban drainage design and evaluation of combined sewer overflow impacts. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2400-2408. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.014>

García, P., & Rodríguez, V. (2021). Impacto de la biorremediación en la mejora de la calidad del agua en Latinoamérica. *Journal of Environmental Management*, 287, 112270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112270>

García, M., López, R., & Mendoza, A. (2022). Boryana cheran y Zirahuen: Evaluación de hongos locales para la biorremediación en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 35(2),

45-58.

Garzón, R. (2017). Biorremediación: Tecnologías para la restauración de ecosistemas afectados por la contaminación. *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*, 45(1), 67-85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.015>

Garzón JM, Rodríguez-Miranda JP, Hernández-Gómez C. Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Rev Univ. Salud*. 2017;19(2):309-318. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Grasham, C. F., Korzenevica, M., & Charles, K. J. (2019). On considering climate resilience in urban water security: A review of the vulnerability of the urban poor in sub-Saharan Africa. *WIREs Water*, 6(3), e1344. <https://doi.org/10.1002/wat2.1344>

Gray, R. (2019). Watershed management and the challenges of urbanization. *Journal of Environmental Management*, 234, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.018>

Gray, E., S. Ozment, J. Carlos Altamirano, R. Feltran-Barbieri y G. Morales. 2019. "Green-Gray Assessment: Cómo evaluar los costos y beneficios de la infraestructura verde en los sistemas de suministro de agua". Documento de trabajo. Washington, DC: World Resources Institute. Dispon

Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245.

Gomez Delgado, N. M., & Sánchez Cuesta, T. C. (2020). Revisión de eficiencia de hongos ligninolíticos en la biodegradación y adsorción de los metales pesados en aguas residuales textiles.

González, A. M., & Jiménez, B. (2016). Tratamiento de aguas residuales en México: Un análisis histórico y prospectivo. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 32(2), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.rmea.2016.05.005>

González, M., & López, F. (2019). Reciclaje de celulosa orgánica: Un enfoque hacia la sostenibilidad. *Revista de Ciencias Ambientales*, 22(4), 456-470. <https://doi.org/10.1234/abcd.efgh>

González, F. (2016). Gestión del agua en México: Retos y oportunidades para el desarrollo sostenible. *Revista Mexicana de Estudios Ambientales*, 8(2), 112-130. <https://doi.org/10.1016/j.rmea.2016.05.005>

Goodman, R. M. (1978). Urban symbolism and collective agreements in public infrastructure. *Urban Anthropology*, 7(4), 301-322. <https://www.jstor.org/stable/40553032>

Güneralp, B., & Seto, K. C. (2008). Environmental impacts of urban growth from an integrated dynamic perspective: A case study of Shenzhen, South China. *Global Environmental Change*, 18(4), 720-735. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.004>

Hernández, A. L. (2021). Evaluación de sistemas de drenaje en la ciudad de Morelia, Michoacán (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <https://www.umich.mx/tesis/drenaje-morelia>

Herslund, L. (2019). Urban resilience and sustainable water management. *Journal of Urban Planning and Development*, 145(3), 04019014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000505](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000505)

Herslund, L., & Mguni, P. (2019). Examining urban water

management practices—challenges and possibilities for transitions to sustainable urban water management in Sub-Saharan cities. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101573. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719300721>

Hutton, G., Haller, L., & Bartram, J. (2007). Global cost-benefit analysis of water supply and sanitation interventions. *Journal of Water and Health*, 5(4), 481-502. <https://doi.org/10.2166/wh.2007.009>

Instituto de Recursos Mundiales. (2021). Innovaciones en la gestión del agua: Infraestructura verde para la mejora de la calidad del agua en América Latina. World Resources Institute. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36564.45445>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx>

Jones, T., & Green, K. (2019). Regenerative urban habitats: Strategies for revitalizing green spaces and ecosystems. *Ecological Engineering*, 134, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.008>

Jones, A. B. (2019). El papel de los espacios arquitectónicos en el desarrollo cognitivo. En M. R. Johnson (Ed.), *Arquitectura y psicología: Nuevas perspectivas* (pp. 89-104). Editorial Construcción y Mente.

Juwarkar, A. A., Singh, S. K., & Mudhoo, A. (2010). A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 215-288.

Kiran, S., Huma, T., Jalal, F., Farooq, T., Hameed, A., Gulzar, T., ... & Rafique, M. A. (2019). Lignin degrading system of *Phanerochaete chrysosporium* and its exploitation for degradation of synthetic dyes wastewater. *Pol. J. Environ. Stud*, 28(3), 1749-1757.

Lambert, L. A., & Grigg, N. S. (2014). Critical infrastructure system performance models and case histories for sewer and drainage systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 20(4), 04014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000195](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000195)

Lechner, B. E., Rugolo, M., & Mallerman, J. (2018). Hongos comestibles: el cultivo de flammulina velutipes (enokitake). Eudeba

LEÓN PORTILLA, M. (2009). El agua: universo de significaciones y realidades en Mesoamérica. *Ciencias*, (028). Recuperado a partir de <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/11299>

Light, A., & Akama, Y. (2018). Co-designing with communities: Practices and principles. En R. Miller (Ed.), *Innovations in participatory design* (pp. 87-102). Springer

López, R. A., & Ramírez, C. F. (2020). Gestión del drenaje urbano en Morelia: Desafíos y soluciones. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 12(4), 234-250. <https://doi.org/10.1234/engsan.2020.0045>

Marsalek, J., & Chocat, B. (2002). International report: Stormwater management. *Water Science and Technology*, 46(6-7), 1-17. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0583>

Martínez, J. A., & González, F. R. (2020). Aplicación de biorremediación y biofiltración en lagos mexicanos: Un estudio de caso en el Lago de Cuitzeo. *Revista Mexicana de Ingeniería Ambiental*, 18(2), 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.rmia.2020.03.002>

Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill

Education.

Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1354422. Meza, L., & García, M. (2020). Biorremediación en México: Evolución y aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 32(4), 231-246. <https://doi.org/10.1016/j.ria.2020.06.012>

Meza, L. (2022). Revolution of regenerative habitats: Rethinking urban spaces and human-nature interaction. *Journal of Sustainable Cities*, 19(3), 245-260. <https://doi.org/10.1016/j.jsc.2022.04.006>

Mohammadi-Sichani, M. E., Mazaheri Assadi, M., Farazmand, A., Kianirad, M., Ahadi, A. M., & Hadian-Ghahderijani, H. (2019). Ability of *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* and *Ganoderma lucidum* compost in biodegradation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2313-2320.

Naciones Unidas. (2023). World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>

Naciones Unidas. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. United Nations. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>

Nagendra, H., Bai, X., Brondizio, E. S., & Lwasa, S. (2018). The urban south and the predicament of global sustainability. *Nature*

Sustainability, 1(7), 341-349. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0101-5>

Organización de las Naciones Unidas. (2017). Resumen sobre la Convención para la diversidad biológica de la ONU. 34 pp. Consultado el 9 de julio de 2019. Disponible en: https://elpais.com/sociedad/2007/05/22/actualidad/1179784806_850215.html.

Orozco S, López LB, Montiel, Espino, Guerra, Vargas, Alfonso, Rivero (2024) Green practices in wastewater treatment: Upcycling avocado waste for enhanced water sanitation. Case study: WWTP in San Francisco Pichátaro, Michoacán, Results in Engineering, Volume 24, 2024, 103347, ISSN 2590-1230, Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103347>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024016001>)

Pérez, L. (2022). Avances en el saneamiento urbano en Morelia. Noticias de Morelia. <https://www.noticiasmorelia.com/saneamiento-avances>

Pointing, S. B. (2001). Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(1-2), 20-33. Ramírez Espinoza, E. L. Evaluación de la capacidad de enmienda de suelos salinos, utilizando sustratos agotados por el cultivo de *Pleurotus Ostreatus* y su caracterización de carga enzimática.

Ramírez, J., & Cruz, A. (2019). Técnicas de biorremediación en cuerpos de agua de Michoacán: Casos de estudio en el lago de Cuitzeo y el río Chiquito. *Revista Mexicana de Ciencias del Agua*, 13(3), 101-120. <https://doi.org/10.1016/j.rmca.2019.04.005>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475.

Rodríguez, L. H. (2019). Bioremediación de cuerpos de agua: Casos de éxito en Latinoamérica. Ediciones Científicas.

Roy, M., Sharma, P., & Kumar, S. (2021). Efficacy of *Pleurotus* spp. in the bioremediation of polluted waters: A review. *Journal of Environmental Management*, 287, 112308.

Sahraoui, A. L. H., Calonne-Salmon, M., Labidi, S., Megloul, H., & Fontaine, J. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation: Concepts, challenges, and future perspectives. In *Assisted Phytoremediation* (pp. 49-100). Elsevier.

sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2012). *Convivial design: How design affects people and how people affect design*. Routledge.

Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., Gunten, U. V., & Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109-136.

Singh, C., Ward, P., & Mondal, A. (2020). Transforming urban risk management: insights from the urban poor in Guwahati, India. *Environmental Science & Policy*, 109, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.012>

Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196.

Smith, J. (2023). Sustainable development and the balance between social, economic, and environmental progress. *Sustainability Science*, 18(2), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s11625-023-01145-6>

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig,

- C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., & McNeill, J. (2011). The Anthropocene: Conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 842-867. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0327>
- Silva, J. P., & Ramírez, M. C. (2018). Impacto de la bioremediación en la calidad del agua del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 25(1), 103-120.
- Silva, R. (2018). Contaminación del agua en Morelia: Impactos y soluciones sustentables. *Anales de la Academia de Ciencias Ambientales de Michoacán*, 15(1), 45-62. <https://doi.org/10.1016/j.acaam.2018.02.003>
- Suchman, L. A. (1987). *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge University Press.
- Srivastava, A., Rani, R. M., Patle, D. S., & Kumar, S. (2022). Emerging bioremediation technologies for the treatment of textile wastewater containing synthetic dyes: a comprehensive review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(1), 26-41.
- Spezzia Mazzocco, T. (2012). Selección de cepas de hongos comestibles productoras de lacasas y su potencial de aplicación a procesos de biorremediación en zonas contaminadas con hidrocarburos en México.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Tirado Torres, D. (2016). Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por un consorcio bacteria-Pleurotus ostreatus en suelo contaminado con petróleo
- Torasso, N., & Goyanes, S. N. (2023). Desarrollo de membranas nanoestructuradas por la técnica de electroestirado para su aplicación a la remediación de medio ambiente: influencia de la morfología en el mojado (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Física Desarrollo de membranas nanoestructuradas por la técnica de electroestirado para su aplicación a la remediación de medio ambiente: influencia de la morfología en el mojado Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias Físicas Nicolás Torasso Director de Tesis: Dra. Silvia Goyanes Consejero de Estudios: Dr. Fernando Minotti Lugar de Trabajo: Laboratorio de Polímeros y Materiales Compuestos, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires Buenos Aires).
- UNESCO. (2015). *Water for a sustainable world: The United Nations World Water Development Report 2015*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://doi.org/10.18356/8372391d-en>
- UN-Habitat. (2016). *World Cities Report 2016: Urbanization and Development – Emerging Futures*. United Nations Human Settlements Programme. <https://doi.org/10.18356/4451f8b1-en>
- Vandelook, S. (2021). Potencial del micelio en la regeneración de cuerpos de agua. *Revista de Biotecnología Ambiental*, Recuperado de: <https://tecscience.tec.mx/es/biotecnologia/hongos-para-limpiar-el-agua/>
- Torres, S., & Martínez, H. (2022). Sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales: El papel de la biorremediación en México.

- Ecología y Desarrollo Sustentable, 29(2), 315-334. <https://doi.org/10.1016/j.ecyds.2022.03.008>
- Valencia Ponce, D. (2017). Biorremediación de aguas contaminadas con *Escherichia coli* usando micofiltros de *Trametes versicolor* y *Ganoderma* sp.
- Vandelook, W. (2021). Forest edge effects on wild bee diversity: A global meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 58(3), 478-488. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13807>
- Vargas, F. (2021). Historia y evolución de las estrategias de descontaminación de agua en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Vargas, C. y Gallegos, B. (2024). Revaloración de la cosmovisión mesoamericana con relación al agua [Revaluation of the Mesoamerican worldview in relation to water]. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-15 recuperado de: <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-1132>
- Vezzoli, C., & Manzini, E. (2008). *Design for environmental sustainability*. Springer.
- von Ziegler Muñoz, B. P., Aguilar, T. C. E., & García, A. I. (2022). Aplicación de hongos ligninolíticos para la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (124), 15-33.
- World Health Organization. (2019). *Water, sanitation and hygiene: Measuring inequalities in WASH*. World Health Organization.
- Yépez-García, A., Balza, L. H., & Serebrisky, T. (2022). Reformas para impulsar una infraestructura sostenible e inclusiva en América Latina y el Caribe. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.18235/0003759>
- Yépez, R. (2022). Urbanización y sus efectos en la calidad de las fuentes hídricas en Latinoamérica. *Revista Latinoamericana de Ciencias Ambientales*, 52(4), 145-160. <https://doi.org/10.21829/relaca.v52i4.2022>
- Zhang, Y., Wang, Z., & Li, H. (2019). The potential of *Ganoderma* spp. in bioremediation: A review. *Biological Conservation*, 235, 158-168
- Ponce-Vega, L. A. (2015). Puquios, qanats y manantiales: gestión del agua en el Perú antiguo. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 12(3), 279-296.
- Wright, K. R., Zegarra, A. V., Wright, R. M., & McEwan, G. F. (2009). *Machu Picchu: maravilla de la ingeniería civil*. ASCE Press.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., & Fidel, L. . (2009). La geología, evolución geomorfológica y geodinámica externa de la ciudad inca de Machupicchu, Cusco-Perú. *Revista De La Asociación Geológica Argentina* , 65 (4), 725-747. Recuperado de <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/878>
- Argueta, A., & Castilleja, A. (2008). El agua entre los purhépecha de Michoacán. *Cultura y representaciones sociales*, 3(5), 64-87.
- IMTA (2004). *Descubre una cuenca: El Lago de Pátzcuaro*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Broda, Johanna (2001). "Introducción", en Johanna Broda y Feliz Báez-Jorge, *Cosmovisión, ritual e identidad de los p*
- Villagrán, D. M., Fernández Severini, M., Abasto, B., Spetter, C. V., & Biancalana, F. (2019). Interacción entre los metales pesados y la quitina presentes en el seston del estuario de Bahía Blanca. In V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie (RAGSU) (La Plata, 12 al 14 de junio de 2019).

ITSi

Anexos



Aguas filtradas

Pruebas Luz y Resistencia



Anexos

SZG|185

Matriz de Diseño experimental: Desarrollo del Biomaterial Cultivo y Caracterización del Micelio

ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada										
MDA-2025 SZG					Desarrollo del Biomaterial: Cultivo y Caracterización del Micelio					
Fecha de producción	Especie de Hongos	Sustrato agroindustrial	Volumen material seco	Cant agua (Litros)	Tiempo pazeurización	Temperatura	Tiempo de drenado	Cantidad de Micelio	Carbonato de calcio	Yeso{Calcio}
25/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 75%	Fibra de Trigo	500	5	120 Min	70-75° C	8 horas	25%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Agregar agua caliente y poner en una fuente de calor baja		Disponer en recipiente inclinado				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								
24/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 75%	Fibra de Coco	500	5	120 Min	70-75° C	8 horas	25%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Toda la fibra de sustrato debe estar sumergida en el agua		Utilizar una malla estéril				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								
27/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 75%	Fibra de Avena	500	5	180 Min	70-75° C	8 horas	25%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Control cada 30 minutos de la temperatura		Dejar en Area Oscura				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								
25/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 85%	Fibra de Trigo	500	5	120 Min	70-75° C	8 horas	15%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Agregar agua caliente y poner en una fuente de calor baja		Disponer en recipiente inclinado				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								
24/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 85%	Fibra de Coco	500	5	120 Min	70-75° C	8 horas	15%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Toda la fibra de sustrato debe estar sumergida en el agua		Utilizar una malla estéril				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								
27/03/2025	Pleurotus ostreatus Gris 85%	Fibra de Avena	500	5	180 Min	70-75° C	8 horas	15%	4%	2%
		2 Petri x 30g		Control cada 30 minutos de la temperatura		Dejar en Area Oscura				
		4 Cubo x 60g								
		2 Bolsa x 1kl								

Figura 1. Diseño experimental Producción del micelio seta Gris. Fuente: Autoría propia

Matriz de Diseño experimental: Revisión del Biomaterial Cultivo del Micelio



ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada									
Desarrollo del Biomaterial: Cultivo y Caracterización del Micelio						Rango de Temperatura 22°C/27° C			
Protocolo experimental produccción del Micelio de especie <i>Pleurotus ostreatus</i> Setas gris y balnea									
	Día 1	Día 6	Día 12	Día 18	Día 24	Día 30	Día 40	Humedad	Observaciones
TRIGO								70-75%	Se observa expansión en hifas del micelio, el creciemnto es lento
	25° C	25° C	26° C	25° C	25° C	26° C	25° C	Temperatura	
AVENA								70-75%	la fibra se coloniza por el micelio en puntos radiales de la semilla
	25° C	25° C	26° C	27° C	26° C	25° C	25° C	Temperatura	
COCO								70-75%	el tejido del Micelio se observa resistente y continuo
	25° C	25° C	26° C	25° C	26° C	25° C	25° C	Temperatura	
	Día 1	Día 6	Día 12	Día 18	Día 24	Día 30	Día 40	Humedad	Observaciones
TRIGO								70-75%	Se presento contaminación por exceso de humedad
	25° C	25° C	25° C	25° C	26° C	25° C	25° C	Temperatura	
AVENA								70-75%	Se presento contaminación por protocolo de estéril
	25° C	25° C	26° C	27° C	25° C	26° C	25° C	Temperatura	
COCO								70-75%	Se controlo la contaminación en el sustrato de coco
	25° C	25° C	26° C	26° C	26° C	25° C	25° C	Temperatura	

Figura 2. Diseño experimental Revisión del biomaterial cultivo del micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **TRIGO** al 75% con 25% de micelio

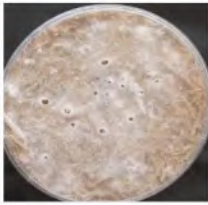
		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico	
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio			
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final		
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: TRIGO 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g		
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g		
Bolsa por 2 kilogramos			2kg		
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo		
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días		
Estructura Biomaterial					
					
Día 1			Día 15		
Día 30			Reducción de humedad		

Figura 3. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **TRIGO al 85% con 15% de micelio**

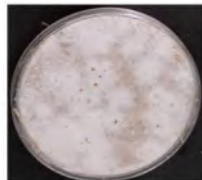
	ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada			Registro fotografico
	Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio			
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final	
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: TRIGO 85%	Micelio de <i>Pleurotus Ostreatus</i> al 15%	20g	
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g	
Bolsa por 2 kilogramos			2kg	
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo	
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días	
Estructura Biomaterial				
				 
Día 1	Día 15	Día 30	Reducción de humedad	

Figura 4. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **AVENA** al 75% con 25% de micelio

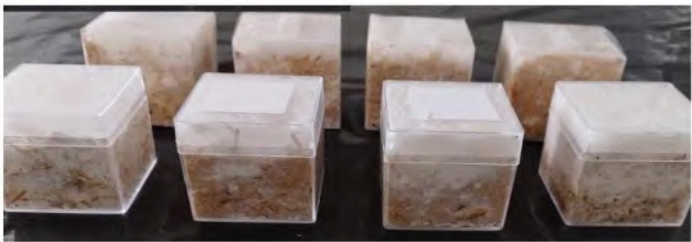
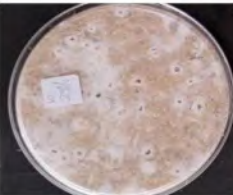
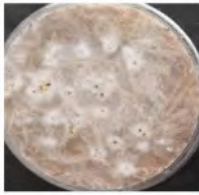
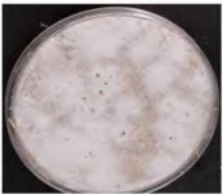
 		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico	
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio		   	
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final		
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: AVENA 85%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 15%	20g		
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g		
Bolsa por 2 kilogramos			2kg		
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo		
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días		
Estructura Biomaterial					
   					
Día 1	Día 15	Día 30	Reducción de humedad		

Figura 5. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **AVENA** al 85% con 15% de micelio

		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio		
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final	
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: AVENA 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g	
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g	
Bolsa por 2 kilogramos			2kg	
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo	
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días	
Estructura Biomaterial				
				 
Día 1	Día 15	Día 30	Reducción de humedad	

Figura 6. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **COCO al 75% con 25% de micelio**

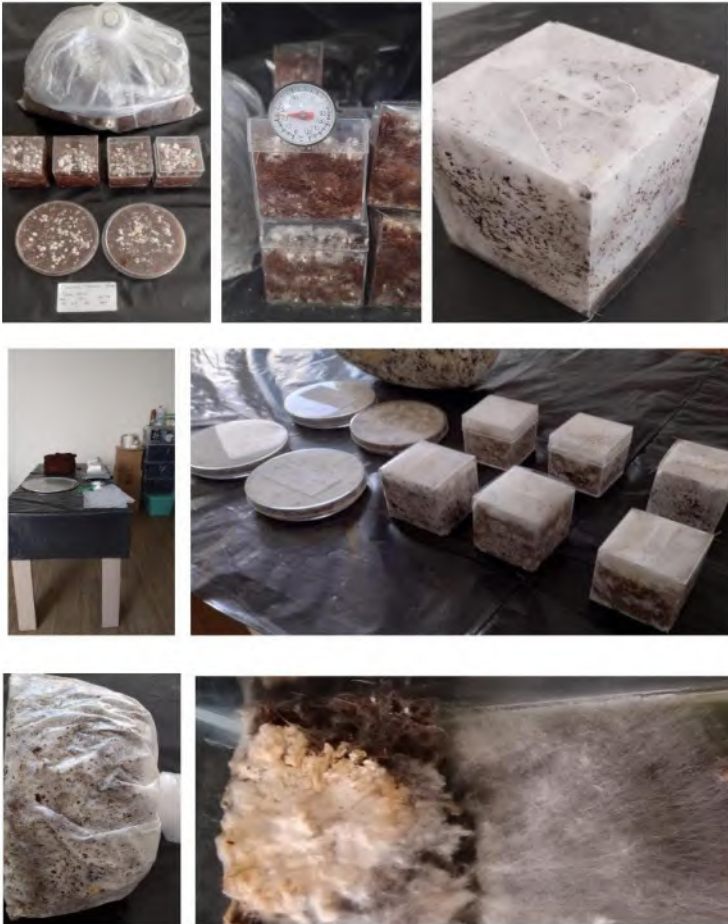
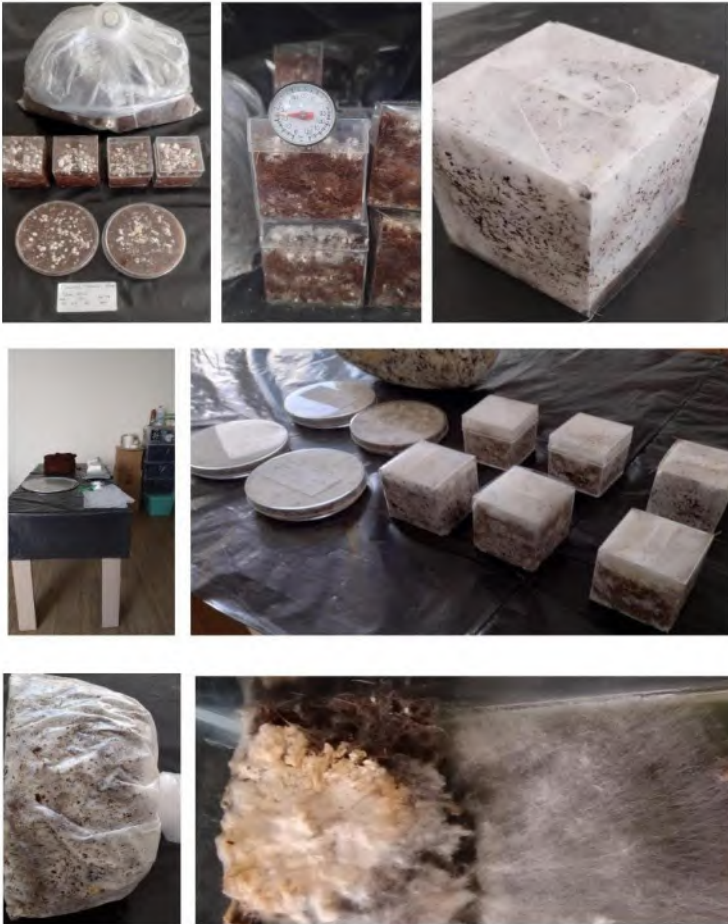
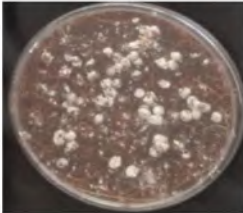
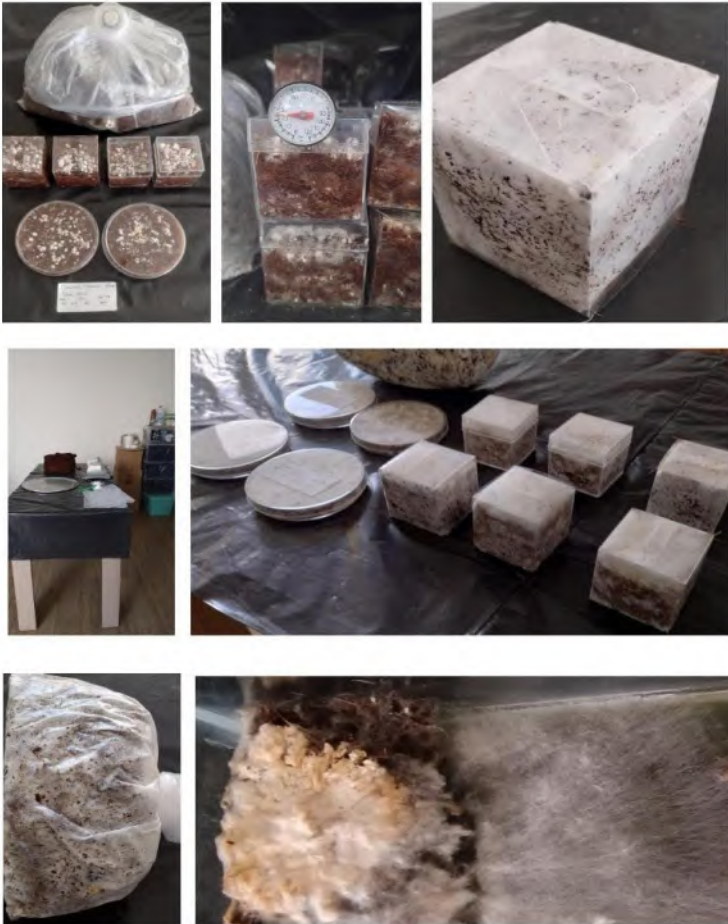
		ITSí - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico	
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio			
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final		
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: COCO 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g		
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g		
Bolsa por 2 kilogramos			2kg		
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo		
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días		
Estructura Biomaterial					
   					
Día 1 Día 15 Día 30 Reducción de humedad					

Figura 7. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **COCO al 85% con 15% de micelio**

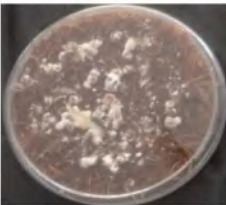
		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio		
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final	
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: COCO 85%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 15%	20g	
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g	
Bolsa por 2 kilogramos			2kg	
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo	
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días	
Estructura Biomaterial				
				  
Día 1	Día 15	Día 30	Reducción de humedad	

Figura 8. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **Ciclo final de micelio de TRIGO compostaje**

 	ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		
	Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio ciclo final (compostaje)		
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: TRIGO 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g
Bolsa por 2 kilogramos			2kg
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días
Ciclo Final (Compostaje Jardín)			
			

Registro fotografico

Figura 9. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **Ciclo final de micelio de AVENA compostaje**

	ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada			Registro fotografico
	Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio ciclo final (compostaje)			
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final	
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: AVENA 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g	
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g	
Bolsa por 2 kilogramos			2kg	
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo	
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días	
Ciclo Final (Compostaje Jardín)				
				

Figura 10. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **Ciclo final de micelio de COCO compostaje**

		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada		Registro fotografico
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio ciclo final (compostaje)		
Especimen	Material base	Aglutinante	Peso Final	
Cubo de 5x5x5cm 60 g	Fibra Agroindustrial: COCO 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al J25%	20g	
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g			5g	
Bolsa por 2 kilogramos			2kg	
Humedad	Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo	
70-75% interior en fibra	2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días	
Ciclo Final (Compostaje Jardín)				
  				

Figura 11. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas del Biomaterial de **Ciclo final de micelio de COCO compostaje**

		ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada			Registro fotografico	
		Fichas tecnicas del Biomaterial de Micelio ciclo final (compostaje)				
Especimen		Material base	Aglutinante	Peso Final		
Cubo de 5x5x5cm 60 g		Fibra Agroindustrial: COCO 75%	Micelio de Plerurotus Ostreatus al 25%	20g		
Placa de petri de 8cm con espesor de 1cm 30 g				5g		
Bolsa por 2 kilogramos				2kg		
Humedad		Nutrientes	Tiempo de incubación	Revision del cultivo		
70-75% interior en fibra		2% carbonato de calcio y 1% yeso	15 días	6 Días		
Ciclo Final (Compostaje Jardín)						
						

Figura 12.. Fichas técnicas del biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia

Fichas Técnicas de costo del Biomaterial de micelio

ITSi - Biofiltros de Micelio para el tratamiento de agua contaminada				Fichas tecnica costos del Biomaterial de Micelio			
Item	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total	Item	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Materiales				Instrumentos			
Semilla de Micelio por kg	4	\$ 100,00	\$ 400,00	Medidor todo en 1 (T° ph)	1	\$ 850,00	\$ 850,00
Fibra de TRIGO por 5 kg	1	\$ 200,00	\$ 200,00	Termometro de cocina	3	\$ 250,00	\$ 750,00
Fibra de AVENA por 5 kg	1	\$ 200,00	\$ 200,00	Gramera	1	\$ 200,00	\$ 200,00
Fibra de COCO por 5 kg	2	\$ 250,00	\$ 500,00	Horno o deshidratado	1	\$ 500,00	\$ 500,00
Yeso por 2 kg	2	\$ 30,00	\$ 60,00	Cucharas medidoras	2	\$ 100,00	\$ 200,00
Carbonato de Calcio por 2 kg	2	\$ 50,00	\$ 100,00	Cintas de etiqueta	4	\$ 50,00	\$ 200,00
Area de cultivo				Ligas plasticas	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Película plastica bolsa negra por 1	2	\$ 100,00	\$ 200,00	Guantes	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Alcohol por 1 litro	5	\$ 100,00	\$ 500,00	Tapabocas	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Superficie de acero inoxidable	1	\$ 500,00	\$ 500,00	Olla tamalera de 1o litros	1	\$ 600,00	\$ 600,00
Agua Oxigenada por 1 litro	3	\$ 100,00	\$ 300,00	Malla de drenaje	2	\$ 600,00	\$ 1.200,00
Cloro por 5 litro	1	\$ 100,00	\$ 100,00	Moldes e Impresiones			
Cajas Moviles Acrilicas de 40x35x40	6	\$ 350,00	\$ 2.100,00	Molde de Bloque Acrilico corte a laser	2	\$ 250,00	\$ 500,00
Recipientes				Patrones interiores 3D	4	\$ 50,00	\$ 200,00
Bolsas Trnasparente de 2kg	1	\$ 200,00	\$ 200,00	Moldes iniciales impresión 3D	1	#####	\$ 2.000,00
Cubos de acrilico por 50 unidades	1	\$ 200,00	\$ 200,00	Pruebas de validación de agua			
Cajas petri de 8 cm	2	\$ 100,00	\$ 200,00	Frascos de vidrio de 1 litro	12	\$ 30,00	\$ 360,00
Pecesar de vidrio	3	\$ 200,00	\$ 600,00				
Impresiones				Neveras de Unicel	2	\$ 120,00	\$ 240,00
Papeleria			\$ 500,00	Hielos	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Nota: Todas las compras se realizaron con el recurso otorgado en la beca del SECIHT [Pago de tramites y transporte]				Tuberia PVC Y accesorios del microcosm	1	\$ 500,00	\$ 500,00
Total de inversión Cultivo Domestico 30 kg micelio							\$ 15.720,00

Figura 13. Tabla de ficha técnica de costos de biomaterial de micelio Fuente: Autoría propia





QR [Tesis Completa, video, presentación, web sibe]



**Ciencia y
Tecnología**
Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación





ITSi | TEREKUA

Autora:

Arq. Stephanie Zapata Giraldo

2348344a@umich.mx

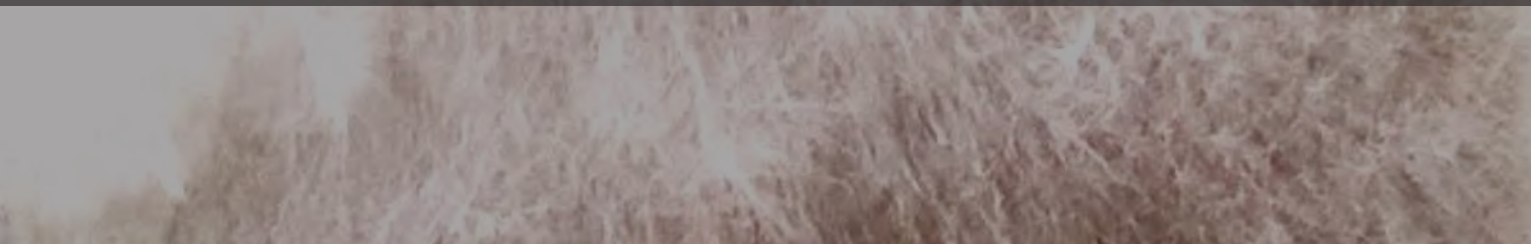
2023-2025

[MDA]

Morelia-Mexico



MAESTRÍA
EN DISEÑO AVANZADO



Cecilia Isabel Salcedo Martínez

LA EFICIENCIA DE LA CALIDAD EN EL SERVICIO DE LOS CLIENTES DE LA FERIA DE LA ESFERA DE TLALPUJAHUA, MI...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:536865809

Fecha de entrega

5 dic 2025, 9:47 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

5 dic 2025, 10:32 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

LA EFICIENCIA DE LA CALIDAD EN EL SERVICIO DE LOS CLIENTES DE LA FERIA DE LA ESFERA DE TL....pdf

Tamaño del archivo

2.0 MB

148 páginas

30.552 palabras

187.824 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Administración	
Título del trabajo	LA EFICIENCIA DE LA CALIDAD EN EL SERVICIO DE LOS CLIENTES DE LA FERIA DE LA ESFERA DE TLALPUJAHUA, MICHOACÁN	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Cecilia Isabel Salcedo Martínez	0700076x@umich.mx
Director	Bertha Molina Quintana	bertha.molina@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Mauricio Aurelio Chagolla Farias	mae.administracion.titulacion@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Ayuda en la redacción de algunos términos estadísticos.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Sí	Ayuda para revisar la correcta traducción del abstract.
Revisión y corrección de estilo	Sí	Al finalizar la tesis, se hizo una revisión de corrección de estilo, ayudándonos en la revisión de signos de puntuación y congruencia de singulares, plurales.
Análisis de datos	Sí	Ayuda para guía al usar el programa estadístico SPSS.
Búsqueda y organización de información	Sí	Ayuda en la búsqueda de literatura
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Cecilia Isabel Salcedo Martínez.
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 2 de diciembre de 2025.