

ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE PRETRATAMIENTO (FÍSICOS, QUÍMICOS Y FISICOQUÍMICOS) APLICADOS A LA BIOTRANSFORMACIÓN DEL JACINTO DE AGUA (*EICHHORNIA CRASSIPES*) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN EL MUNICIPIO DE GAMARRA, CESAR.

JOSE DUVAN CARREÑO CAMARGO
LIZETH VALENTINA TOLOZA VERGEL

DIRECTOR.

Mg. RAMÓN EMILIO RINCÓN QUINTERO

CODIRECTORA.

Mg. LAURA TALÍA PICÓN GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR - SECCIONAL AGUACHICA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
AGUACHICA CESAR

2025

ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE PRETRATAMIENTO (FÍSICOS, QUÍMICOS Y FISICOQUÍMICOS) APLICADOS A LA BIOTRANSFORMACIÓN DEL JACINTO DE AGUA (*EICHHORNIA CRASSIPES*) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN EL MUNICIPIO DE GAMARRA, CESAR.

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL.

JOSE DUVAN CARREÑO CAMARGO
LIZETH VALENTINA TOLOZA VERGEL

DIRECTOR.

Mg. RAMÓN EMILIO RINCÓN QUINTERO

CODIRECTORA.

Mg. LAURA TALÍA PICÓN GONZÁLEZ

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Ctel DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN INDUSTRIAL DESARROLLO Y APLICACIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y PRODUCTOS PARA LA INDUSTRIA CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA (FIBRAS Y BIOPOLIMEROS)

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR - SECCIONAL AGUACHICA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
AGUACHICA CESAR

2025

NOTA DE APROBACIÓN:

El trabajo de grado de los estudiantes Jose Duvan Carreño Camargo y Lizeth Valentina Toloza Vergel, titulado Análisis de los métodos de pretratamiento (físicos, químicos y fisicoquímicos) aplicados a la biotransformación del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol en el municipio de gamarra, cesar ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO
EVALUADORA 1

JOSE CAMILO ANGARITA LINERO
EVALUADOR 2

RAMÓN EMILIO RINCÓN QUINTERO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

LAURA TALIA PICON GONZALEZ
CODIRECTORA DEL TRABAJO DE
GRADO

DEDICATORIA

A ti, mi Nona querida, que, con tu amor infinito, tu ejemplo incansable y tus enseñanzas llenas de sabiduría me formaste como la persona que soy hoy. Aunque ya no estás físicamente, tu presencia me acompaña en cada paso. Este logro también es tuyo, porque fuiste tú quien me enseñó a no rendirme y a luchar por mis sueños.

A mi prima, Karina, con profundo cariño y gratitud. No tengo palabras suficientes para expresar el inmenso agradecimiento que siento. Gracias de todo corazón, por ayudarme y creer en mí.

A mi mamá Patricia y mi tía Madeleine, por su apoyo incondicional y por acompañarme en este largo camino. Gracias por estar siempre, incluso en los momentos difíciles.

Lizeth Valentina Toloza Vergel

DEDICATORIA

A mis padres, por creer en mí incluso cuando dudé, por su apoyo incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo.

A mis profesores, gracias por compartir su conocimiento, su paciencia y por inspirarme a ser un mejor profesional cada día.

En especial, a mi hermana, cuya ayuda, apoyo y cariño fueron una fuerza constante en todo este camino.

Jose Duvan Carreño Camargo

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestra fuerza en los momentos difíciles, por darnos sabiduría, paciencia y el valor necesario para culminar este proceso. Sin su guía y bendición, nada de esto habría sido posible.

A la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica, por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales, y a cada uno de los docentes que, con dedicación, aportaron a nuestro crecimiento académico y personal a lo largo de la carrera.

Al profesor Ramón Emilio Rincón, nuestro director y a la profesora Laura Talía Picón, nuestra codirectora, por su orientación, compromiso y valiosas sugerencias durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para dar forma a esta monografía.

A nuestros evaluadores Yina Paola Ortega Santiago y Jose Camilo Angarita Linero por su tiempo, dedicación y criterio con el que valoraron este proyecto. Sus aportes fueron esenciales para el fortalecimiento del trabajo final.

A nuestras familias, por su acompañamiento constante, su amor incondicional y el respaldo brindado a lo largo de este proceso.

Y de manera especial, a Katlyn, por su colaboración, apoyo y disposición que fueron de gran ayuda durante el desarrollo de esta monografía.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1. Jacinto de agua.....	16
3.2. Biotransformación.....	18
3.3. Bioetanol.....	19
3.3.1. Jacinto de agua como fuente de bioetanol.....	19
3.3.2. Procesos biotecnológicos del bioetanol.....	22
3.4. Pretratamientos de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol.....	23
3.4.1. Físicos:.....	23
3.4.2. Químicos:.....	25
3.4.3. Fisicoquímicos:.....	27
3.5. Sostenibilidad.....	28
3.5.1. Ambiental.....	28
3.5.2. Económico.....	29
4. ESTADO DEL ARTE.....	30
4.1. Internacional.....	30
4.2. Nacional.....	34
4.3. Regional y local.....	37
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	39
5.1. Enfoque de la investigación.....	39
5.2. Tipo de investigación.....	39
5.3. Alcance.....	40
5.4. Diseño de la investigación.....	40
5.4.1. Población.....	40
5.4.2. Muestra.....	41
5.5. Instrumentos de recolección de datos.....	42
5.6. Análisis y tabulación de datos.....	43
5.7. Procedimiento.....	44
5.8. Hipótesis.....	53

5.8.1. Hipótesis Nula	53
5.8.2. Hipótesis Alternativa	53
5.9. Variables	53
6. DESARROLLO DEL TEMA.	55
6.1. Resultados	55
6.1.1. Objetivo específico 1: Identificar las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua que influyen en su disponibilidad como recurso para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar.	55
6.1.2. Objetivo específico 2: Comparar los métodos de biotransformación aplicables al Jacinto de agua con énfasis en procesos biotecnológicos que permitan su valorización en productos agroindustriales.	58
6.1.3. Objetivo específico 3: Proponer estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) en la producción de bioetanol, de acuerdo con los pretratamientos más destacados en la literatura y en el contexto del municipio de Gamarra, Cesar.	85
6.2. Discusión de resultados	88
6.3. Conclusiones	92
6.4. Recomendaciones	93
7. BIBLIOGRAFÍA	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación Taxonómica del Jacinto de agua (Eichhornia Crassipes).	17
Tabla 2. Composición de la biomasa del Jacinto de agua.	20
Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión	42
Tabla 4. Matriz de Leopold adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.	48
Tabla 5. Matriz de MCDM adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.....	50
Tabla 6. Matriz DOFA para los métodos de pretratamiento para el Jacinto de agua en Gamarra, Cesar	51
Tabla 7. Variables independientes y dependientes.	53
Tabla 8 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por molienda mecánica mediante la Matriz de Leopold.	58
Tabla 9 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por extrusión mediante la Matriz de Leopold.	59
Tabla 10 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por irradiación con microondas mediante la Matriz de Leopold.	60
Tabla 11 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento ácido mediante la Matriz de Leopold.	62
Tabla 12 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento alcalino (NaOH o Ca (OH) ₂) mediante la Matriz de Leopold.	64
Tabla 13 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento organosolv mediante la Matriz de Leopold.	65
Tabla 14 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por peróxido de hidrogeno mediante la Matriz de Leopold.	67
Tabla 15 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por tratamiento hidrotermal mediante la Matriz de Leopold.	69
Tabla 16 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por explosión de vapor mediante la Matriz de Leopold.	71
Tabla 17. Matriz de Leopold adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.	72
Tabla 18 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento de molienda mecánica.....	73
Tabla 19 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento por extrusión	74

Tabla 20 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento por irradiación con microondas	75
Tabla 21 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento ácido	76
Tabla 22 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento alcalino	77
Tabla 23 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento ordanosolv	77
Tabla 24 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento peróxido de hidrogeno	78
Tabla 25 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento hidrotérmico	79
Tabla 26 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento explosión de vapor	81
Tabla 27. Matriz de MCDM adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.....	81
Tabla 28. Matriz DOFA para los métodos de pretratamiento para el Jacinto de agua en Gamarra, Cesar	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evidencia visual de la invasión del Jacinto de agua en distintas zonas del municipio de Gamarra, Cesar.....	14
Figura 2. Ejemplar de Jacinto de agua recolectado.	16
Figura 3. Diagrama obtención de bioetanol a partir de Jancito de agua.	21
Figura 4. Representación gráfica de la Celulosa, la Hemicelulosa y la Lignina.	23
Figura 5. Formula de muestreo para poblaciones finitas	41
Figura 6. Formula de normalización.....	47
Figura 7. Esquema morfológico del Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).	56

Análisis de los métodos de pretratamiento (físicos, químicos y fisicoquímicos) aplicados a la biotransformación del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol en el municipio de gamarra, cesar.

1. INTRODUCCIÓN

El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), es catalogado como una de las especies invasoras más agresivas a nivel mundial, constituye un problema ambiental y socioeconómico debido a su rápido crecimiento, alta capacidad invasora y severos impactos que ocasionan daños sobre los ecosistemas acuáticos. Según Villamagna y Murphy (2010) esta planta afecta la biodiversidad y limita el uso de los cuerpos de agua. Cabe señalar que, Harun et al., (2021) advierten que su expansión genera altos costos de control, además de afectar a las comunidades, ya que dificulta la pesca y el transporte fluvial. De igual forma, Onyari et al., (2024) García (2024) y L. Xu et al., (2024) destacan que los problemas asociados a la presencia de esta planta han sido reportados en diversos países, lo cual confirma que su manejo y control es un desafío no solo local, sino también global.

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022) reconoce al Jacinto de agua como una de las especies invasoras de mayor impacto ecológico y socioeconómico. Investigaciones como las de Brand (2020) y Tejada et al., (2017) han documentado su proliferación en importantes cuerpos hídricos del país, entre ellos el embalse de Muña, la laguna de Fúquene y la laguna de Sonso. Ante esto, Carreño y Rodríguez (2019) plantean la necesidad de implementar estrategias de manejo y control sostenibles, que solo reduzcan su expansión, sino que permitan su aprovechamiento productivo como biomasa.

Por otro lado, a nivel regional, la proliferación del Jacinto de agua no solo representa un problema ecológico, sino también social y de salud pública. Escobar et al., (2021), en su estudio sobre la Ciénaga de Santo Tomas en el Atlántico, evidencian que las especies invasoras, entre ellas el Jacinto de agua, afectan actividades esenciales como la pesca artesanal, el riego agrícola y el abastecimiento de agua para las comunidades, además de convertirse en hábitat para plagas, generando transmisiones de enfermedades. De forma similar, Montes (2025) advierte que en la Ciénega de Mallorquín la expansión de esta planta ha puesto en riesgo la biodiversidad, asimismo

Martínez y Pinilla (2014) destacan que, en el departamento del Cesar, específicamente en las Ciegas de Zapatosa, Mata de Palma y la Pachita, su presencia deteriora la calidad del agua y afecta los macroinvertebrados acuáticos, lo que refleja un impacto ambiental y económico directo a las comunidades ribereñas.

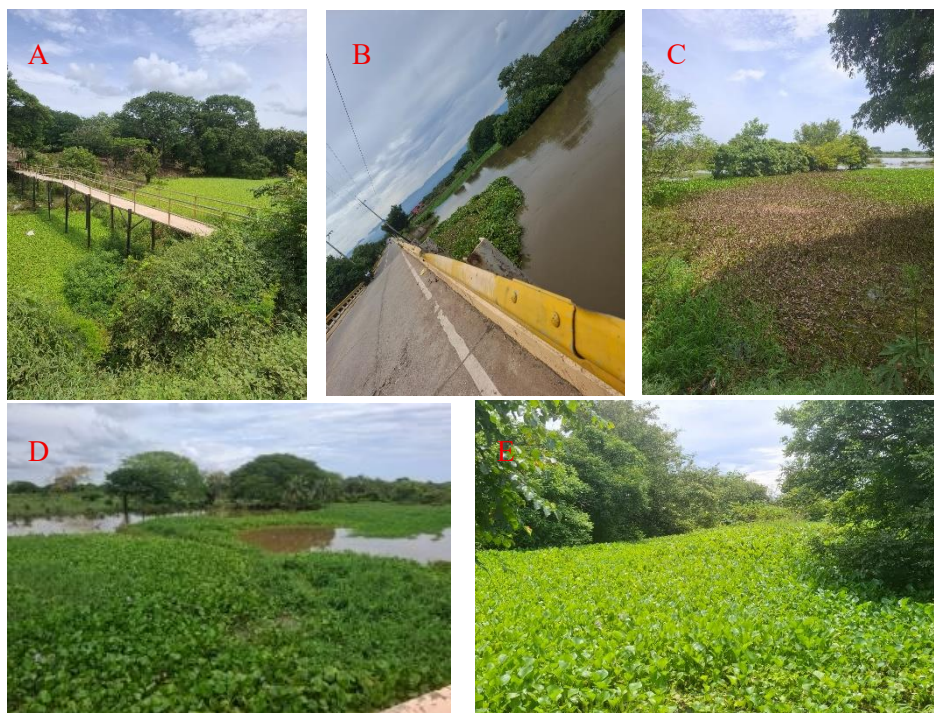
Asimismo, en el municipio de Gamarra, ubicado a orillas del río Magdalena, la presencia del Jacinto de agua ha comenzado a generar preocupaciones (Ver figura 1), especialmente a las actividades de pesca y movilidad fluvial entre las comunidades. Ante los panoramas anteriormente mencionados, el aprovechamiento del Jacinto de agua como materia prima lignocelulósica surge como una alternativa viable.

En este sentido, Awasthi et al., (2013) explican que su biomasa puede ser utilizada en la producción de bioetanol, siempre que se realicen los pretratamientos adecuados que faciliten el acceso a la celulosa y hemicelulosa. De acuerdo con Ospino et al., (2020), esta etapa es fundamental para optimizar los procesos de hidrólisis y fermentación, mientras que Espinosa et al., (2021) y Mankar et al., (2021), destacan que estos pretratamientos permiten superar la resistencia estructural de la lignina y ayudan a obtener mayores rendimientos en el proceso de producción. Más recientemente, Kululo et al., (2025) confirman su potencial como insumo para la producción de biocombustibles en contextos locales.

Por lo que el objetivo general de esta investigación es analizar los diferentes métodos de pretratamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar, identificando sus ventajas, limitaciones y potencial aplicación. Con ello no solo se busca aportar una alternativa de aprovechamiento sostenible, sino también generar bases que contribuyan al desarrollo de soluciones energéticas renovables a nivel local, al mismo tiempo de abrir camino para futuras investigaciones y proyectos similares en la región y en el departamento.

¿Qué métodos de pretratamiento resultan más viables para transformar el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar, considerando tanto su potencial agroindustrial como la mitigación de impactos ambientales?

Figura 1. Evidencia visual de la invasión del Jacinto de agua en distintas zonas del municipio de Gamarra, Cesar.



Nota. Fotografías tomadas por los autores. Se observan sectores del río Magdalena y sus afluentes en Gamarra, Cesar, cubiertos por Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*): (A) puente peatonal hacia viviendas. (B) puente vehicular ingreso al municipio, (C y D) sectores conocidos como “las playas”, y (E) afluente cercano al municipio donde se ubican canoas para pesca artesanal y cruce del río.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los diferentes métodos de biotransformación del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*), con énfasis en los procesos de pretratamiento (Físicos, químicos y fisicoquímicos), para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua que influyen en su disponibilidad como recurso para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar.

Comparar los métodos de pretratamiento empleados en la biotransformación del Jacinto de agua, destacando sus ventajas, limitaciones y condiciones óptimas para la producción de bioetanol.

Proponer estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la producción de bioetanol, de acuerdo con los pretratamientos más destacados en la literatura y en el contexto del municipio de Gamarra, Cesar.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Jacinto de agua

Según E. Verdejo et al., (2006) el Jacinto de agua es una especie acuática flotante, con raíces sumergidas de libre flotación, las cuales pueden llegar a medir entre 50 cm hasta 1 m en condiciones tropicales favorables. Esta planta origina un rizoma ramificado que puede medir hasta 30 cm, con varios entrenudos que producen una hoja y una raíz. Los brotes auxiliares desarrollan hojas gruesas, brillantes, cerosas que sobresalen de la superficie del agua. Estas hojas tienen forma ovoide u oval que pueden medir entre 2 a 15 cm de alto y de 2 a 10 cm de ancho, los bordes son ligeramente curvados, se organiza en forma de espiral con apariencia de roseta.

Los peciolos son gruesos, esponjosos, alargados y se encuentran hinchados en el centro formando un bulbo flotante con tejido esponjoso. Cada peciolo sostiene una estípula ancha y membranosa que envuelve la siguiente hoja. Los tallos son pubescentes y presentan dos brácteas junto a una estípula, que suele producir entre 8 y 25 flores. Cada flor por lo general posee seis pétalos de tonalidades violetas, lilas, azuladas o moradas, con forma ovalada o alargada y de longitud de hasta 4 cm. El pétalo superior destaca por una mancha amarilla en el centro rodeada por un borde azul (Ver Figura 2).

Su sistema radicular está altamente desarrollado y puede representar más del 50 % de la biomasa total de la planta. Sus raíces son adventicias y fibrosas, con una longitud promedio que varía entre los 10 y 30 cm. Estas muestran un aspecto plumoso con tonalidades violetas o azules oscuros y contienen pigmentos solubles que ayudan a proteger la raíz de los herbívoros según lo expuesto por los autores anteriormente mencionados.

Figura 2. *Ejemplar de Jacinto de agua recolectado.*



Nota. Foto tomada por los autores.

Asimismo, Bachiller (2019) describen que el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) también conocido como Tarulla, Buchón de agua y Lirio acuático es una macrófita acuática flotante, herbácea perenne de agua dulce. Puede vivir en aguas tranquilas tales como, canales, zanjas, arroyos, ríos y pantanos. De acuerdo con Gajendra et al., (2020), se considera como una de las malezas acuáticas más nocivas y dañinas del mundo, provocando graves problemas como daños a la biodiversidad, alteración a los ecosistemas acuáticos dulces, especies nativas, obstrucción para la navegación y enfermedades por plagas como malaria, dengue y encefalitis.

Por su parte, Karouach et al., (2022) señalan que el Jacinto de agua se reconoce por su rápida tasa de propagación, donde 2 plantas pueden multiplicarse hasta alcanzar 1.200 en tan solo 120 días, lo que le permite cubrir grandes superficies de agua en un corto lapso de tiempo. Esta prolongada propagación puede aumentar por los fuertes vientos y oleajes, pero también se debe al vertimiento de los desechos agrícolas y humanos en las fuentes hídricas. Dichos aportes incrementan las cantidades de nitrógeno y fósforo, nutrientes que, junto con la temperatura, el agua y el aire, constituyen factores determinantes para su crecimiento y reproducción.

La siguiente tabla muestra la clasificación taxonómica del Jacinto de agua:

Tabla 1. Clasificación Taxonómica del Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*).

Reino	Vegetal
<i>División</i>	Magnoliophyta
<i>Clase</i>	Liliopsida
<i>Orden</i>	Pontederiales
<i>Familia</i>	Pontederiaceae
<i>Género</i>	<i>Eichhornia</i>
<i>Especie</i>	<i>Crassipes</i>

Nota. Datos tomados de Huamani et al., (2021).

3.2. Biotransformación

De acuerdo con Gkantzou et al., (2021), la biotransformación es un proceso en el que los compuestos químicos son modificados por sistemas biológicos hacia la síntesis de compuestos novedosos. Se considera como una de las áreas de investigación más relevantes y prometedoras para el desarrollo de la producción ecológica y sostenible en la industria. Este método se destaca sobre los métodos químicos, ya que incluye la incorporación de catalizadores naturales como células o enzimas, ya que estos proveen ventajas sobre los catalizadores químicos a causa de su alta selectividad, elevada actividad en reacciones suaves, su capacidad de convertir sustratos complejos y su naturaleza biodegradable y no tóxica.

Por su parte, Rustamova et al., (2024) señalan que la biotransformación constituye una técnica esencial para producción de metabolitos de alto valor, pues consiste en la conversión parcial o total de una molécula química mediante un sistema biológico. En este sentido, las plantas pueden considerarse como laboratorios biosintéticos para la producción de metabolitos primarios como los azúcares y aminoácidos, así como también metabolitos secundarios como los glucósidos. La biotransformación permite convertir precursores económicos y fácilmente disponibles en productos de mayor valor, utilizando cultivos celulares que catalizan reacciones químicas a través de procesos de oxidación, hidroxilación, reducción, metilación, amino acilación y glucosilación – acilación. Además, estos cultivos celulares muestran tolerancia a diversos compuestos, como esteroides, alcaloides y compuestos fenólicos.

Asimismo, Fazili et al., (2022) mencionan que la eficiencia de la biotransformación está fuertemente condicionada por factores bioquímicos, fisiológicos y ambientales, entre los que destacan el origen del tejido vegetal, ya que la genética del explante determina la producción de compuestos secundarios; la composición química del medio de cultivo, que influyen tanto en la generación de biomasa como en la síntesis de metabolitos; los reguladores de crecimiento, que inciden en el desarrollo celular y la producción de compuestos; la fuente de carbono, siendo la sacarosa la más utilizada aunque también pueden emplearse la galactosa, fructosa o glucosa; y finalmente, las condiciones físico-químicas como la temperatura, el pH y la intensidad lumínica, que resultan determinantes para la eficacia del proceso.

3.3. Bioetanol

En este contexto, Kumar et al., (2020) explican que el bioetanol se ha consolidado en un importante biocombustible renovable de gran importancia, obtenido a partir de diferentes biomásas, con gran potencial de sustituir los combustibles fósiles, aportar seguridad energética y protección ambiental frente a los combustibles normalmente convencionales. Los biocombustibles se clasifican en cuatro generaciones, de acuerdo con el tipo de materias primas utilizadas. La primera generación (1G) se basa en la fermentación de glucosa provenientes de cereales mediante cepas comunes de levaduras; sin embargo, genera conflictos con la industria alimentaria por competir con materias primas destinadas al consumo humano.

Para mitigar esta problemática surge el bioetanol de segunda generación (2G), que emplea biomasa lignocelulósica como materia prima, aunque requiere un pretratamiento de hidrólisis que encarece el proceso en comparación con la 1 G. La tercera generación (3G) se centra en el uso de microbios fotosintéticos, particularmente algas, como recurso principal, mientras que la cuarta generación (4G) emplea la ingeniería metabólica de las algas y otros fotoautótrofos para optimizar la producción de bioetanol.

3.3.1. Jacinto de agua como fuente de bioetanol

La producción de bioetanol depende de diversas fuentes de biomasa, las cuales se dividen en tres categorías: materiales ricos en azúcares, materiales ricos en almidón y materiales lignocelulósicos. En este sentido, Hoyamo et al., (2024) explican que las materias ricas en azúcares incluyen biomasa con altos niveles de este componente, como la caña de azúcar, el sorgo dulce y diversas frutas. Otros materiales potenciales son los cultivos ricos en almidón como los son los cereales, la yuca y la papa; sin embargo, estos forman parte de la dieta humana por lo que su uso en la producción de bioetanol resulta costoso y genera competencia con la alimentación. Por tal motivo, se recomienda el uso de biomasa vegetal no comestible, como malezas y residuos de la agricultura. En este sentido, el Jacinto de agua se presenta como una maleza invasora cuya biomasa puede emplearse en la producción de bioetanol, lo que permite alcanzar un doble propósito; sustituir combustibles fósiles y controlar la contaminación generada por esta especie.

Actualmente, solo el 1% del bioetanol se obtiene de la biomasa lignocelulósica, para transformación de biocombustible de segunda generación. Al respecto Monroy et al., (2022) señalan que el Jacinto de agua está compuesto principalmente por celulosa y hemicelulosa, por lo

que requiere de un preacondicionamiento más riguroso que permita la fermentación del etanol, dada su estructura rígida. La conversión de esta etapa en bioetanol es posible gracias a su composición, la cual facilita la obtención de mayores concentraciones de azúcares fermentables; posteriormente, mediante procesos de hidrólisis química o enzimática y la acción microbiológica, dichos azúcares pueden transformarse en etanol (ver Figura 3).

Tabla 2. *Composición de la biomasa del Jacinto de agua.*

Componentes	% Composición
Lignina	10
Celulosa	25
Hemicelulosa	35
Ceniza	20
Nitrógeno	03

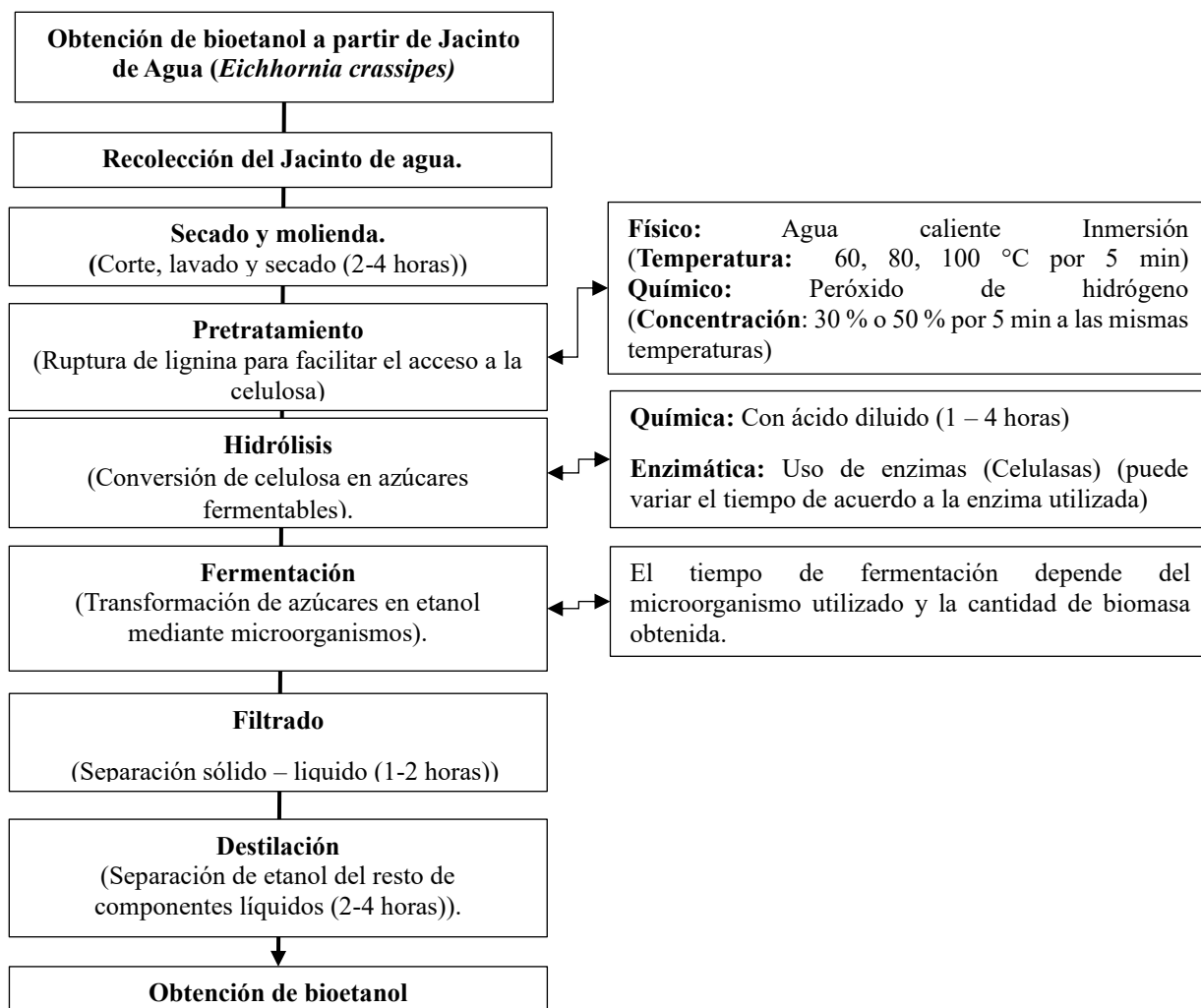
Nota. Datos tomados de Awasthi et al., (2013).

La tabla 2 presenta la composición de la biomasa del Jacinto de agua, cuyos polímeros de carbohidratos deben transformarse en azúcares simples antes de la fermentación, proceso que se lleva a cabo mediante hidrólisis. De acuerdo con Woźniak et al., (2025), existen dos tipos principales de hidrólisis: química y enzimática. En el caso de la hidrólisis química, se emplean compuestos como ácidos y álcalis para facilitar la penetración y ruptura de la biomasa. Los ácidos son los más utilizados y pueden aplicarse de dos formas: (i) hidrólisis con ácido concentrado, realizada a bajas temperaturas, pero con concentraciones elevadas de ácido (entre 30% y 70%); y (ii) hidrólisis con ácido diluido, que es el método más común, pues puede usarse tanto como pretratamiento para la hidrólisis enzimática como estrategia principal para descomponer la lignocelulosa en azúcares fermentables. No obstante, Awasthi et al., (2013) advierten que la hidrólisis con ácido puede favorecer a la formación de productos no deseados, como ácido fórmico, ácido acético y ácido urónico.

La hidrólisis enzimática consiste en la descomposición de moléculas complejas en compuestos más simples mediante la acción de enzimas en presencia de agua. Este proceso bioquímico aplicada a la biomasa lignocelulósica es considerado el método más adecuado para despolimerizar los polisacáridos en azúcares, los cuales pueden convertirse en una amplia gama de combustibles y productos químicos. Al respecto Da Silva et al., (2020) destacan que, independientemente de la biomasa o el objetivo de las rutas bioquímicas o químicas, el procesamiento de los jarabes de azúcar requiere de dos pasos fundamentales: el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica, con

el fin de hacerla susceptible a la acción enzimática, y la posterior hidrólisis enzimática del material pretratado para obtener dichos jarabes fermentables.

Figura 3. Diagrama obtención de bioetanol a partir de Jacinto de agua.



Nota. Datos tomados de Monroy et al., (2022).

3.3.2. Procesos biotecnológicos del bioetanol

La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, como el Jacinto de agua, se fundamenta en una serie de procesos biotecnológicos que permiten transformar los carbohidratos estructurales en un biocombustible de gran valor energético. Principalmente estos procesos, aunque han sido estudiados, continúan evolucionando con el fin de optimizar la eficiencia y la garantizar la sostenibilidad del proceso.

De acuerdo con Meléndez (2021), los procesos biotecnológicos para la producción de bioetanol comprenden principalmente cinco etapas: primera, trituración de la materia prima, licuefacción, sacarificación, fermentación y destilación, la materia prima se tritura y se mezcla con agua. Los almidones o la celulosa presentes deben transformarse en azúcares fermentables mediante la acción de enzimas en el proceso llamado licuefacción y sacarificación. Finalmente, las levaduras o microorganismos fermentan esos azúcares, produciendo alcohol etílico (etanol) y CO₂. Finalmente, el bioetanol es separado y purificado por destilación para alcanzar un mejor estado de pureza para su uso como combustible.

En el caso de los biocombustibles de segunda generación (2G), que utilizan biomasa lignocelulósica como bagazo de caña, paja de arroz o residuos agrícolas, de los cuales es necesario aplicar un pretratamiento previo. Según Mankar et al., (2021), esta etapa es esencial para remover la lignina y desestructurar la hemicelulosa, de manera que la celulosa quede disponible para la hidrólisis enzimática. Por lo anterior, este paso resulta ser primordial para la eficacia de la sacarificación y la fermentación, ya que facilita la liberación de azúcares fermentables y en algunos casos, permite realizar la integración de los procesos en un mismo biorreactor, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos de producción.

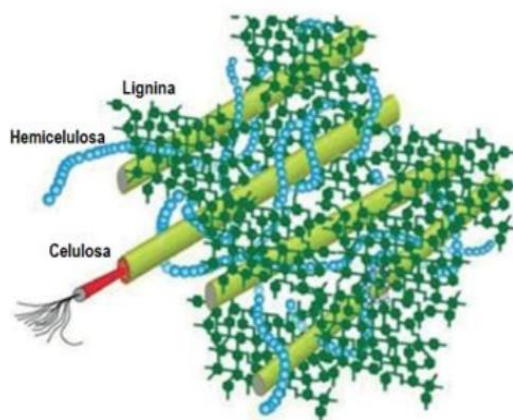
En este sentido, el Jacinto de agua representa un recurso prometedor, debido a su rápido crecimiento y abundancia en los cuerpos de agua, especialmente en regiones tropicales y subtropicales como en el municipio de Gamarra, Cesar. Esta planta presenta un ciclo de vida corto y una alta capacidad de reproducción y puede llegar a cubrir grandes extensiones de agua, generando un problema ambiental, pero al mismo tiempo una oportunidad para su aprovechamiento como fuente renovable de biomasa lignocelulósica. Debido a su composición rica en celulosa y hemicelulosa, se convierte en una materia prima viable para procesos

biotecnológicos que transformen sus componentes estructurales en azúcares fermentables y, posteriormente en bioetanol.

3.4. Pretratamientos de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol

Tal como señalan Espinoza et al., (2025), la biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina; esta última funciona como una barrera física y química que dificulta la conversión eficiente de la celulosa en glucosa. En este sentido, el pretratamiento se convierte en una etapa fundamental en la producción de bioetanol, pues permite romper las estructuras complejas de lignina y la hemicelulosa que rodean a la celulosa (ver Figura 4), facilitando así la acción de las enzimas para la liberación de los azúcares fermentables.

Figura 4. Representación gráfica de la Celulosa, la Hemicelulosa y la Lignina.



Nota. Tomado de Afanasjeva et al., (2017).

Entre los métodos de pretratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos más relevantes se encuentran los siguientes:

3.4.1. Físicos:

Como lo explican, Luzardo et al., (2023) los pretratamientos físicos son fundamentales en la deestructuración de la biomasa lignocelulósica, ya que actúan principalmente mediante mecanismos mecánicos o térmicos sin necesidad de emplear reactivos. Entre los métodos más utilizados se destacan la molienda mecánica, la extrusión y la irradiación con microondas, siendo los mejores en cuanto a eficacia, viabilidad técnica y potencial de escalamiento industrial. A continuación, se definen cada uno de estos procesos.

3.4.1.1. Molienda Mecánica:

Por su parte, Espinosa et al., (2021) señalan que la molienda mecánica es el pretratamiento físico más utilizado debido a su simplicidad, accesibilidad tecnológica y eficacia para reducir tanto el tamaño de la partícula como la cristalinidad de la celulosa. Este método consiste en la aplicación de fuerzas mecánicas como impacto, compresión o cizallamiento que permiten romper la estructura física de la biomasa lignocelulósica y, con ello, aumentar la superficie de contacto expuesta para la acción enzimática posterior. Dicho proceso no solo facilita la accesibilidad de las enzimas a los polímeros estructurales, sino que también contribuye a mejorar el rendimiento de la conversión en azúcares fermentables.

Además, la molienda mecánica se considera una técnica adaptable, ya que puede combinarse con otros pretratamientos físicos, químicos o biológicos para incrementar la eficiencia. Sin embargo, aunque es una estrategia ampliamente implementada en el ámbito experimental e industrial, también presenta ciertas limitaciones, como el alto consumo energético cuando se busca alcanzar tamaños de partícula muy finas.

3.4.1.2. Extrusión:

Según Duque (2015) la extrusión es un proceso continuo que combina las altas temperaturas con presión y fuerzas de cizallamiento para desestructurar la biomasa y facilitar su posterior aprovechamiento. Esta tecnología se ha destacado no solo por su versatilidad, sino también por altamente escalable, lo que la convierte en una de las alternativas más prometedoras para el pretratamiento de materias lignocelulósicas a nivel industrial, gracias a su eficiencia energética y a la capacidad de mantener un procesamiento constante y en gran volumen. Asimismo, la extracción se clasifica de puede clasificar dentro de los métodos fisicoquímicos, ya que involucra tanto mecanismos térmicos como químicos; sin embargo, su principio fundamental radica en la aplicación de fuerzas de cizallamiento, las cuales generan modificaciones estructurales en la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Dichas modificaciones aumentan la accesibilidad de las enzimas durante las etapas posteriores de hidrólisis, lo que se traduce en un mayor rendimiento en la obtención de azúcares fermentables. Además, se ha documentado que este pretratamiento ofrece ventajas e cuando a la reducción del tiempo en el proceso, la disminución en el consumo de reactivos químicos y una menor generación

de subproductos inhibidores, factores que refuerzan su potencial para ser implementado en procesos de producción sostenibles y económicamente viables.

3.4.1.3. Irradiación con Microondas:

En relación con los avances en pretratamiento innovadores, Venegas et al., (2024) describen que el uso de microondas se basa en la aplicación de radiación electromagnética para generar calor interno en la biomasa mediante la excitación y rotación de las moléculas polares. Este mecanismo permite un calentamiento uniforme y rápido, lo que contribuye a la ruptura de las estructuras lignocelulósicas y favorece la accesibilidad de la celulosa para las enzimas. Esta tecnología no solo se aplica con el fin de reducir tiempo de pretratamiento, sino también para incrementar la eficiencia de la hidrólisis enzimática y disminuir el consumo energético en comparación con otros métodos convencionales.

También, se ha documentado que la irradiación con microondas puede combinarse con soluciones químicas, como ácidos o álcalis, potenciando el efecto de destrucción de la biomasa y facilitando la liberación de azúcares fermentables. De este modo, se considera una alternativa prometedora dentro de los métodos de pretratamiento especialmente en contexto donde se busca un balance entre rapidez, eficiencia y sostenibilidad del proceso

3.4.2. Químicos:

Los pretratamientos químicos tienen como objetivo de modificar la estructura lignocelulósica de la biomasa para facilitar su posterior degradación y conversión en azúcares fermentables. Este proceso puede emplear diferentes agentes químicos que actúan sobre la hemicelulosa, la lignina y la celulosa, lo que favorece la solubilización de los componentes, aumentando la accesibilidad de la biomasa, tal como lo explican Espinosa et al., (2021). Entre los métodos más utilizados se encuentran el pretratamiento ácido, pretratamiento alcalino, proceso organosolv y pretratamiento con peróxido de hidrógeno, que se definen a continuación:

3.4.2.1. Pretratamiento ácido:

De acuerdo con lo señalado por Dagnino et al., (2021), el pretratamiento ácido consiste en el uso de ácidos diluidos, como el ácido sulfúrico, para romper la matriz lignocelulósica, lo que provoca la hidrólisis parcial de la hemicelulosa y la celulosa amorfa, liberando azúcares fermentables. Este método se utiliza principalmente para solubilizar las hemicelulosas y mejorar la accesibilidad de la celulosa a las enzimas; sin embargo, puede generar compuestos no deseados

como furfural y 5-hidroximetilfurfural, los cuales afectan negativamente las etapas posteriores del proceso.

3.4.2.2. Pretratamiento alcalino:

En este sentido, Pantoja et al., (2015) explican que el pretratamiento alcalino utiliza álcalis como hidróxido de sodio o calcio, para eliminar la lignina y partes de las hemicelulosas, lo que incrementa la porosidad y la digestibilidad enzimática de la biomasa. Este proceso resulta eficaz porque modifica la estructura rígida de la biomasa, permitiendo una mayor acción de las enzimas degradadoras y, en consecuencia, mejorando el rendimiento en la obtención de azúcares fermentables.

3.4.2.3. Proceso organosolv:

De acuerdo con lo planteado por Kululo et al., (2025), el pretratamiento organosolv es una estrategia emergente para la fracción de biomasa lignocelulósica. Este método emplea mezclas de solventes orgánicos, como el etanol, metanol o acetona combinados con agua o incluso con un catalizador ácido, con el propósito para disolver la lignina y liberar la celulosa para su posterior hidrólisis. Las condiciones operativas suelen incluir temperaturas entre 120 y 200 °C, un tiempo de exposición promedio de 30 a 90 minutos, y un pH ligeramente ácido. Por su parte Rabelo et al., 2023 explican que esta técnica no solo permite una eficiente recuperación de la lignina de alta calidad, sino que también acelera la accesibilidad enzimática a la celulosa y facilita la recuperación de solventes mediante destilación, características que la convierten en una alternativa altamente atractiva para su implementación en biorrefinerías integradas.

3.4.2.4. Pretratamiento con peróxido de hidrógeno:

En el estudio realizado por Yan et al., (2020) muestran que el pretratamiento con peróxido de hidrogeno aprovecha las propiedades oxidativas de este compuesto, lo que permite degradar de selectivamente la lignina bajo condiciones moderadas de temperatura y presión. Este proceso mejora la porosidad de la biomasa y facilita la acción de las enzimas sobre la celulosa, logrando remover entre el 40 y el 70 % de la lignina y parte de la hemicelulosa, alcanzando altos rendimientos en las etapas posteriores como la hidrólisis enzimática. Además, los autores señalan que la combinación de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) con álcalis, como el hidróxido de sodio (NaOH), potencia significativamente el efecto del pretratamiento, alcanzando hasta un 83% de eficiencia en la liberación de los azúcares fermentables. De esta manera, este pretratamiento

representa una alternativa económica, ambientalmente amigable y eficaz para la producción de bioetanol de segunda generación.

3.4.3. Físicoquímicos:

En este sentido, Bayona (2021) explica que los pretratamientos físicoquímicos combinan procesos físicos y químicos con el fin de modificar la estructura lignocelulósica, facilitando su posterior degradación y conversión en azúcares fermentables. Entre los métodos más relevantes se encuentran el hidrotérmico y la explosión de vapor, siendo usados principalmente su eficiencia y por la reducción en el uso de químicos agresivos, constituyendo una base sólida para la bioconversión industrial de biomasa.

3.4.3.1. Tratamiento hidrotérmico:

Según Martín et al., (2022), el pretratamiento hidrotérmico representa una etapa indispensable en la conversión de biomasa lignocelulósica hacia bioetanol, ya que permite desestructurar la matriz compacta de celulosa, hemicelulosa y lignina, mejorando la accesibilidad enzimática. Esta técnica se destaca por sus avances tecnológicos y su aplicación en operaciones industriales, influyendo significativamente en la eficiencia de los procesos como la sacarificación y la fermentación. El método utiliza agua a temperatura y presión elevadas para solubilizar la hemicelulosa y transformar la estructura interna de la biomasa, aumentando significativamente la accesibilidad de la celulosa para la hidrólisis enzimática. Además, se recomienda porque no requiere el uso de químicos agresivos y contribuye a minimizar la generación de compuestos inhibidores.

3.4.3.2. Explosión de vapor:

El tratamiento de explosión por vapor es un método físicoquímico altamente eficiente para biomasa lignocelulósica. En este proceso, la biomasa se expone a altas presiones y temperaturas mediante vapor saturado, seguido de una descompresión rápida que altera profundamente su estructura interna y rompe la matriz lignocelulósica. Además, Ziegler et al., (2021) señalan que esta técnica se distingue por su capacidad para aumentar significativamente la digestibilidad de la celulosa, al generar una mayor porosidad, fragmentación y deslocalización de la lignina, facilitando las etapas siguientes como la hidrólisis enzimática y fermentación. De manera complementaria, Du et al., (2019) destacan que la explosión por vapor no solo mejora la

digestibilidad, sino que también acelera la liberación de azúcares fermentables desde la biomasa, aumentando la eficacia del proceso de fermentación.

3.5. Sostenibilidad

3.5.1. Ambiental

Como argumenta Ruggerio (2021), el desarrollo sostenible se ha convertido en un referente para la investigación científica sobre el medio ambiente, vinculando tratados internacionales, constitucionales y leyes en diversos países del mundo. Pero también utilizado en la producción agrícola, negocios, la industria, y el desarrollo urbano, convirtiéndose en una base conceptual de enfoque teóricos como la economía verde y la economía circular. El concepto de desarrollo sostenible se asocia a menudo con el de sostenibilidad, utilizándose como sinónimos incluso en el ámbito científico y académico. Sin embargo, diferentes corrientes de pensamiento señalan que el desarrollo sostenible es un concepto contradictorio debido a lo imposible que se ha convertido sostener un crecimiento económico infinito en un planeta limitado.

A pesar del impacto negativo que genera el Jacinto de agua en el ecosistema acuático, esta planta presenta beneficios financieros potenciales debido a sus diversas aplicaciones industriales. Según lo señalan Karouach et al., (2022), puede emplearse como agente de fitorremediación, purificación de aguas domésticas residuales, utilización de la fibra para producir diversos productos como, biopolímeros, biofertilizantes, alimentación animal, bioenergía, biocombustibles. De manera complementaria, el Jacinto de agua posee propiedades farmacológicas, actuando como antioxidante, antiinflamatorios, anticancerígenos, antitumorales y cicatrizante, y también se obtienen de él otros productos como enzimas y condensadores. Por último, su material puede emplearse para la fabricación de muebles y artesanías, ampliando así su valor económico e industrial.

De esta manera, la biotransformación del Jacinto de agua no solo ayuda a mitigar su impacto ambiental, sino que también impulsa a desarrollar alternativas sostenibles para generación de productos de valor agregado. El aprovechamiento del Jacinto de agua no solo fortalecerá la agroindustria, sino que también incorpora un enfoque ambiental al transformar una especie invasora en un recurso de alto valor, por lo que esta iniciativa contribuye de manera directa al cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (2015).

Específicamente el ODS 7 Energía Asequible y no contaminante, ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico, ODS 9 Industria, Innovación e infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsable, ODS 13 Acción por el clima. De esta manera, la biotransformación del Jacinto de agua no solo ofrece soluciones innovadoras a problemas ambientales y económicos, sino que al mismo tiempo contribuye activamente con estos objetivos, logrando promover un modelo de desarrollo, sostenible, económico e inclusivo.

3.5.2. Económico

La invasión del Jacinto de agua tiene un gran impacto en las zonas rurales, principalmente en aquellas que dependen de los cuerpos de agua para su sustento, como las comunidades de pescadores. Esta planta genera no solo consecuencias ambientales, sino también, socioeconómicas, al alterar las actividades diarias y afectar la salud de las personas. Asimismo, influye en las lluvias locales, reduce el flujo del agua en los ríos, promueve la sedimentación, la desoxigenación y el deterioro de la calidad del agua, en consecuencia, disminuyendo la población de peces y organismos acuáticos, y al mismo tiempo, aumentando la proliferación de vectores de enfermedades.

No obstante, según Harun et al., (2021), aunque el Jacinto de agua provoca una grave degradación ambiental y representa una carga económica significativa para su gestión, también ofrece valiosas perspectivas de aprovechamiento, especialmente en zonas rurales. Esta planta cuenta con un alto potencial para generar recursos que sustente sistemas microeconómicos locales, fomentado actividades productivas que pueden incluir la elaboración de bioenergía, biocombustibles, alimentación animal y otros productos.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Internacional

En el presente apartado se tienen como referencia los estudios realizados a nivel internacional que abordan la producción de bioetanol a partir de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Dichas investigaciones evidencian el potencial de esta planta como fuente de biomasa, dado a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, las cuales pueden transformarse en azúcares fermentables para la obtención de biocombustibles. De esta manera se busca comprender la forma en que se ha utilizado el Jacinto de Agua en procesos previos de producción de bioetanol, identificando las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos en distintos contextos.

Principalmente, en un estudio realizado por Cevallos (2020), titulado “Determinación de las condiciones óptimas de fermentación para la obtención de bioetanol a partir del hidrolizado enzimático con *Trichoderma* del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) proveniente del embalse Amaluza”, se desarrolló una investigación de enfoque cuantitativo, de campo y con un diseño experimental, que tuvo lugar en los laboratorios de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador, con el fin de determinar el potencial que tiene el Jacinto de agua como materia prima para la producción de bioetanol para ofrecer una alternativa amigable con el ambiente. Para el desarrollo del estudio se hizo un pretratamiento físico al Jacinto de agua con el fin de evaluar su composición lignocelulósica que es esencial para la transformación de bioetanol, obteniendo una composición media de 27,03% de celulosa, 20,52% de hemicelulosa y 10,29% de lignina que son ideales para la producción de bioetanol.

A partir de los resultados, se confirmó que el Jacinto de agua es una materia prima viable para la producción de bioetanol puesto que se obtuvo un rendimiento promedio de 50% de etanol en las muestras destiladas siempre y cuando se cumplan ciertos parámetros de fermentación que incluyen un pH de 5, temperatura de 25 °C y tiempo de fermentación de 3 días. Finalmente, se concluyó que el Jacinto de agua es un recurso viable para la producción de bioetanol, debido a su composición lignocelulósica y a las condiciones óptimas establecidas para la fermentación. Además, se comprobó que factores como el pH, la temperatura y el tiempo influyen significativamente en el rendimiento del proceso.

En este sentido, el estudio es relevante para la investigación porque demuestra que el Jacinto de agua puede ser transformado en bioetanol al cumplir ciertos criterios, destacando su potencial

para la agroindustria, lo que aporta al análisis de los métodos de biotransformación que se pueden aplicar al Jacinto de agua puesto que valida científicamente el uso de los microorganismos empleados en el estudio como *Trichoderma spp* y *Saccharomyces cerevisiae* para la conversión de biomasa lignocelulósica. Por último, el estudio demuestra la importancia de establecer parámetros específicos de fermentación que maximizan el rendimiento de la producción.

En la revisión realizada por Espinosa et al., (2021), titulada “Pretratamiento de biomásas lignocelulósicas: breve revisión de los principales métodos utilizados”, se presenta un análisis exhaustivo de las técnicas aplicadas para mejorar la producción de bioenergía a partir de biomasa lignocelulósica mediante la digestión anaerobia. La investigación, es de tipo documental y con un alcance descriptivo-analítico, se basó en tesis doctorales y artículos científicos, destaca la importancia del pretratamiento para romper la capa protectora de lignina que recubre la celulosa y la hemicelulosa, lo que facilita la digestibilidad y el acceso a las enzimas.

Se clasifican cuatro tipos principales de pretratamientos: físicos (Mecánico e irradiación) los cuales reducen el tamaño de la partícula y su cristalinidad, químicos (ácidos, álcalis, oxidantes y organosolventes), estos modifican la estructura lignocelulósica químicamente, fisicoquímicos (explosión de vapor y agua caliente pasteurizada), combinan efectos térmicos y mecánicos para favorecer la ruptura estructural y biológicos (enzimas y microorganismos), que degradan selectivamente la lignina con bajo impacto ambiental. El estudio destaca la eficiencia de cada método y que esto varí a según el tipo de biomasa y las condiciones de aplicación, señalando además la formación de compuestos inhibidores con algunos tratamientos severos. Por último, analizan el potencial futuro de métodos basados en solventes limpios como líquidos iónicos y solventes eutécticos profundos, que permiten una eliminación eficiente de lignina con menor impacto ambiental, pero con costos y desafíos tecnológicos asociados.

En una investigación realizada en la Universidad Técnica del Norte en Ibarra, Ecuador, por Mendoza (2023), titulada “Evaluación del potencial energético del residuo de Lechuguines (*Eichhornia crassipes*) cultivados en plantas de tratamiento de aguas residuales con fines energéticos”, se tuvo como objetivo principal evaluar el potencial energético del Jacinto de agua y determinar una tecnología óptima para su aprovechamiento bioenergético. La investigación siguió un enfoque cuantitativo y un diseño experimental. Además, para el desarrollo de la misma se recolectaron plantas de dos áreas: una planta de tratamiento de aguas residuales y de la laguna de

Yahuarcocha, donde se estimaron cantidades de biomasa de 8,76 toneladas en un área de 175m² y de 90.075,03 toneladas en un área de 1.959.175m² respectivamente. Posteriormente se realizaron los análisis físico-químicos correspondientes y se obtuvieron valores medios de lignina de 10-15%, hemicelulosa de 20-22% y celulosa 60-68%. Además, se estimó el poder calorífico de la biomasa, el cual osciló en un rango de 13 y 16 MJ/kg siendo la planta de tratamiento en la que se registró un mayor valor.

En este sentido, se determinó que el Jacinto de agua dado su alto contenido de celulosa y a su poder calorífico, es apto para su uso bioenergético y se definió que la hidrólisis enzimática es la tecnología más adecuada para llevar a cabo el proceso de aprovechamiento de la planta. De esta manera se validó el uso de Jacinto de agua como un recurso energético viable, por lo que el estudio permite aportar a la investigación un enfoque técnico sobre el aprovechamiento de la biomasa a través de procesos biotecnológicos sostenibles. Además, los resultados sobre la evaluación del Jacinto de agua en aplicaciones bioenergéticas pueden contribuir a promover soluciones para la generación de energía renovable.

En la tesis doctoral presentada por Santana (2020) titulada “Pré-tratamiento de biomassa pelo método organosolv utilizando glicerol para obtenção de açucares reductores”, desarrollo una investigación experimental que tuvo lugar en la Universidad Federal Sergipe, Brasil, se llevó a cabo una investigación aplicada de carácter experimental con un alcance correlacional-explicativo. El objetivo principal fue optimizar el proceso de pretratamiento organosolv con glicerol aplicando diversas biomosas lignocelulósicas, incluyendo el Jacinto de agua, con el fin de maximizar la producción de bioetanol. Evaluó variables como el tiempo, temperatura, relación sólida/líquido, porcentaje de agua y presencia de catalizadores a bases de sales de hierro como CoFe 204, FeCl₃ y FeSO₄. El proceso optimizado indico condiciones específicas: tiempo 10 minutos, temperatura 220 °C y relación solido liquido del 6%, sin la necesidad de utilizar catalizador, lo que llevo a la liberación del 37% de azucares.

La adición de las sales de hierro, específicamente FeCl₃, incremento significativamente la liberación de azucares hasta un 51%, revelando el papel importante que tienen los catalizadores. Además, se identificó que el tipo de lignocelulosa influye en la efectividad del proceso, con el Jacinto de agua mostro mejores considerables en cuanto la digestibilidad enzimática y reducción de la resistencia. Los productos obtenidos presentaron baja formación de inhibidores, permitiendo

la fermentación directa, y la lignina removida fue recuperada por centrifugación. Este estudio es relevante para esta investigación ya que es un método sostenible, eficiente y seguro, utilizando glicerol como solvente verde, para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica con potencial aplicación en la producción de bioetanol, apoyando la viabilidad técnica y ambiental del uso de Jacinto como materia prima.

En un cuanto a un estudio titulado “Bioethanol Production from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) using Different Microbial Inoculants”, realizado por Shakila Begam et al., (2024), en el Departamento de Microbiología, Karpagam Academy of Higher Education, ubicada en Coimbatore, Tamil Nadu, India; se llevó a cabo una investigación aplicada con enfoque cuantitativo, diseño experimental y alcance explicativo. El objetivo principal fue comprender el uso del Jacinto de agua como materia prima para la producción de bioetanol a través del uso de inóculos fúngicos, asimismo, el estudio buscó determinar el potencial que posee el Jacinto de agua en comparación con otros sustratos para producir un rendimiento mayor de bioetanol.

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, por lo que se desarrolló de la siguiente manera: principalmente, se recolectó el Jacinto de agua del lago Ukkadam Valankulam, las hojas de la planta se lavaron para eliminar impurezas y se secaron durante un tiempo de 3 horas a una temperatura de 120 °C. Posteriormente, se procesó la planta hasta convertirla en polvo fino, se tamizó utilizando un tamiz de nailon de 1,5 µm de diámetro y se incubó durante 21 días con los inóculos microbianos seleccionados (*Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger* y *Saccharomyces cerevisiae*), luego se destiló el cultivo para obtener un evaporador rotatorio al vacío para la obtención del bioetanol, el cual fue sometido a un análisis por medio de la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

Finalmente, el estudio demostró mediante los resultados que el Jacinto de agua generó el mayor rendimiento de bioetanol en contraste con otros sustratos lignocelulósicos, como fueron las cáscaras de papa, de yuca y de mijo, por lo que se indicó en el estudio que los inóculos microbianos utilizados permitieron un mayor potencial para la producción de bioetanol. En síntesis, el estudio permitió demostrar que es posible otorgarle un mayor valor económico al Jacinto de agua y que la realización de procesos de biotransformación de la planta hacen posible que se frene la proliferación masiva de la misma en los cuerpos de agua. De esta forma, se puede afirmar que el estudio es relevante para el desarrollo de la investigación debido a que muestra la viabilidad del

Jacinto de agua como materia prima en la producción de bioetanol, lo que respalda el objetivo de evaluar métodos de biotransformación del Jacinto de agua puesto que señala cómo la unión de procesos microbiológicos y físicos pueden maximizar el rendimiento de la planta.

4.2. Nacional

En el presente apartado se tienen como referencia los estudios realizados a nivel nacional que abordan la producción de bioetanol a partir de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Dichas investigaciones evidencian el potencial de esta planta como fuente de biomasa, dado a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa, las cuales pueden transformarse en azúcares fermentables para la obtención de biocombustibles. De esta manera se busca comprender la forma en que se ha utilizado el Jacinto de Agua en procesos previos de producción de bioetanol, identificando las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos en distintos contextos.

En un artículo titulado “*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: un sistema integral de fitorremediación y bioenergía” realizado por Carreño y Rodríguez (2019) en la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia, se llevó a cabo una investigación con el objetivo principal de compilar literatura acerca de los procesos que existen tanto para el tratamiento de aguas como para la producción de biocombustibles a base de Jacinto de agua, con el fin de modelar y proponer un proceso eficiente para la elaboración tanto de biohidrógeno como de bioetanol a base de Jacinto de agua. Para llevar a cabo la investigación se siguió un enfoque cualitativo y un diseño documental, bajo el cual se revisaron diferentes fuentes científicas en bases de datos como Science Direct y Scopus, y se realizó un modelo teórico.

A partir de la información recolectada, los investigadores diseñaron un sistema de fitorremediación para eliminar los metales pesados del agua utilizando el Jacinto de agua, en el cual estimaron que se tratarán 100 L de agua cada día, para los cuáles se proponen 20 plantas de Jacinto de agua, de manera que se tratarán 5 L de agua por cada planta. Posteriormente, se planteó un diseño de producción de energía, puesto que una vez que el Jacinto de agua ha cumplido su función de fitorremediación, su biomasa residual se procesa para producir los biocombustibles anteriormente mencionados.

Para llevar a cabo la biotransformación de la planta, se utiliza un biorreactor para realizar el proceso de hidrólisis, utilizando una solución de 1% NaOH a 60 °C por 12 horas y, posteriormente, un tratamiento con 3% H₂SO₄ bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura. Los azúcares

obtenidos fueron cuantificados mediante el método del ácido dinitrosalicílico, lo que produjo un hidrolizado que fue procesado en un biorreactor de fermentación para la fabricación del bioetanol con *Saccharomyces cerevisiae*. Finalmente, el diseño propuesto por los investigadores también incluyó un biorreactor de fermentación oscura de 5 L para producir el biohidrógeno, para lo cual el biorreactor fue sellado de forma hermética y se purgó utilizando nitrógeno por un tiempo de 5 minutos. Posteriormente, se agitó la mezcla a 120 rpm con una temperatura constante de 60 °C, lo que permitió iniciar el proceso de fermentación oscura, donde los microorganismos descompusieron los azúcares presentes en el hidrolizado residual, generando un biogás rico en hidrógeno. El procedimiento anterior permitió evidenciar la producción de biohidrógeno.

De esta manera, el estudio aporta a la investigación información relevante puesto que evidencia que el Jacinto de agua puede ser utilizado como materia primera para la fabricación de biocombustibles y también, proporciona un sistema para el aprovechamiento total de la planta a través de la producción bioenergética y del proceso adicional de fitorremediación, en el cual la planta tiene potencial en el tratamiento de aguas residuales, lo que promueve la sostenibilidad ambiental y económica.

También, Pantoja et al., (2015) desarrollaron un estudio titulado “Efecto del pretratamiento químico y enzimático en la deslignificación de biomasa agroindustrial típica del Cauca”, llevado a cabo en la universidad del Cauca, se enmarca una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo, diseño experimental y alcance explicativo. El propósito fue evaluar la eficiencia de dos métodos de pretratamiento para modificar la matriz lignocelulósica de residuos como la caña, polvillo de fique y afrecho de yuca, además de una mezcla en partes iguales.

La investigación experimental, llevada a cabo en la Universidad del Cauca, utilizó bisulfito de sodio al 4%p/p para el pretratamiento químico y la enzima lactasa al 1% p/p para el pretratamiento enzimático. Los resultados mostraron que el pretratamiento químico logró la mayor reducción de lignina, con deslignificación del 32.6 % en el bagacillo de caña, un 62.72% en el polvillo de fique, mientras que el pretratamiento enzimático generó una deslignificación de 67.91% en la mezcla de los tres residuos. En todos los casos, la deslignificación produjo un aumento en el contenido de celulosa que osciló entre 25.57% y 200.12%.

Concluyeron que, el pretratamiento químico fue más eficiente para la eliminación de lignina, el enzimático permitió un mayor incremento relativo en el contenido de celulosa. Además, el

estudio resultó que el método químico con bisulfito de sodio es menos agresivo en comparación con otros tratamientos alcalinos más severos, mientras que el enzimático presentó menores impactos ambientales y producción de inhibidores, aunque requirió un tiempo mayor. Estos hallazgos aportan valiosa información para la optimización de los procesos de conversión de biomasa lignocelulósica en biocombustibles en contextos agroindustriales colombianos.

Por otra parte, en un artículo titulado “Evaluación de técnicas de pretratamiento en buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol”, realizado por Ospino et al., (2020) en Medellín, Colombia, corresponde a una investigación aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño experimental y alcance descriptivo. El objetivo principal fue evaluar cuatro pretratamientos con el fin de optimizar la transformación del Jacinto de agua en azúcares y en bioetanol. La investigación fue desarrollada de forma cuantitativa, experimental y descriptiva, donde se evaluaron los pretratamientos de remojo con amoníaco, delignificación alcalina, pretratamiento con ácido diluido y peróxido alcalino. De esta manera, se obtuvieron inicialmente los siguientes resultados en cuanto al rendimiento del etanol en cada pretratamiento: 17,15g/l, 18,10 g/L, 17,73 g/L y 4,53 g/L.

Además, con base en los valores obtenidos se seleccionaron los pretratamientos con ácido diluido y delignificación alcalina para ser utilizados a través de la aplicación del diseño experimental, con el cual se lograron rendimientos de 190,35 L/ton de biomasa seca alimentada respecto al ácido diluido y 197,33 L/ton de biomasa seca alimentada respecto a la delignificación alcalina, ambos provenientes de la porción sólida del Jacinto de agua, lo que confirmó la viabilidad de los métodos utilizados para optimizar la eficiencia en la producción de bioetanol.

Finalmente, se concluyó en el estudio que el Jacinto de agua posee características químicas que lo convierten en una materia prima viable para la producción de bioetanol, señalando la delignificación alcalina como el pretratamiento más eficiente. De esta forma, este estudio realizado a nivel nacional ofrece un aporte significativo a la investigación, puesto que evidencia cómo el Jacinto de agua puede ser sometido a procesos de biotransformación para generar productos de valor agregado como el bioetanol.

En un estudio realizado por Suárez-Forero et al., (2019) titulado “Evaluación del desempeño del pretratamiento con peróxidos de hidrogeno sobre bagazo de caña de azúcar para remoción de lignina”, se llevó a cabo una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo, diseño experimental ²³ y alcance explicativo. El objetivo fue evaluar la eficacia de un pretratamiento

químico oxidativo con peróxido de hidrogeno (H_2O_2) para aumentar la disponibilidad de celulosa en mezclas lignocelulósicas compuestas por bagazo de caña panelero y hojarasca en una proporción 90:10. Utilizando un diseño experimental factorial 2^3 con triplicado en el punto central, se consideraron como variables de tiempo, temperatura y concentración de peróxido de hidrógeno, manteniendo el pH alcalino entre 11 y 12 mediante la adición de NaOH. Los resultados esperados indicaron una remoción máxima de lignina insoluble del 88.5% bajo condiciones “suaves” tiempo de 80 minutos, temperatura de 25°C y un 7% de H_2O_2 y del 79.5 % con 40 minutos, 25°C y 3% de H_2O_2 . Además, se logró una remoción significativa de lignina soluble alcanzando hasta un 61.67%.

El análisis estadístico identificó que las variables de tiempo, temperatura y la interacción entre el tiempo y la concentración fueron estadísticamente significativas para la optimización del proceso. Observaron una reducción en el índice de cristalinidad de la celulosa tras el pretratamiento, lo que favorece la accesibilidad para la hidrólisis enzimática y fermentación subsecuente. Al final concluyeron que este pretratamiento se destacó por ser de bajo costo, eficiente para la remoción de lignina y beneficioso para la obtención de bioetanol de segunda generación. El estudio aporta valiosas aportaciones sobre la optimización de pretratamientos con peróxido de hidrogeno en biomasa lignocelulósica, especialmente en el contexto local.

4.3. Regional y local

A través del análisis de la literatura disponible acerca de la utilización del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en procesos de biotransformación para el posterior uso de su biomasa en productos como bioetanol, biocarbón, alimentación para animales, entre otros, se evidenció que la mayoría de los estudios se centran en países como India, China y algunos de América del Sur, específicamente Brasil y Colombia, pero con poca presencia en regiones específicas o en su defecto contextos locales.

Por otro lado, dada la escasez de literatura relacionada al aprovechamiento del Jacinto de Agua a través de procesos de biotransformación en el contexto local y regional, se hará mención de los hallazgos más relevantes en investigaciones realizadas en zonas aledañas. Principalmente, en el estudio “*Eichhornia crassipes* contaminada con mercurio como un generador de biogás”, realizado por Bossio Sánchez (2021) en la ciudad de Montería, Córdoba, Colombia, se realizó una investigación aplicada, con enfoque cuantitativo, diseño experimental y alcance explicativo. El objetivo principal fue definir el rendimiento que tiene la fabricación de biogás utilizando el Jacinto

de agua como componente exclusivo, el cuál vendría de una zona infestada por metales pesados., mediante el uso del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y estiércol de vaca como inóculo, se utilizaron diferentes proporciones de Jacinto de agua en un rango de 8,8% y 26,4%, mientras que de estiércol de vaca se tuvieron en cuenta proporciones de entre 2,6% y 7,7%. Para la ejecución de las pruebas se utilizó un digestor batch, con condiciones de temperatura de 38°C y un tiempo total de 32 días.

el estudio evidencio que la combinación del Jacinto de agua como sustrato exclusivo o en co-digestión con estiércol de vaca resulta viable para la producción de biogás bajo condiciones mesófilas (38°C), destacándose un rendimiento optimo de metano del 60.91% con una mezcla de 26.24% de Jacinto de agua y 7.7% de estiércol. Asimismo, se identificaron los tratamientos favorables que presentaron condiciones adecuadas de pH, humedad, solidos totales y volátiles, lo que incidió positivamente en la generación del biogás. Un hallazgo clave fue la alta retención de mercurio total en la biomasa tras el proceso, con porcentajes entre 84.74% y 92.59%, lo que evidencia que el metal no se libera al medio. Finalmente, se estableció que los subproductos pueden aprovecharse como abono orgánico líquido.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Enfoque de la investigación

El enfoque metodológico empleado en esta investigación es el mixto, ya que integra estrategias cuantitativas y cualitativas para analizar de manera integral el aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), con énfasis en los procesos de pretratamiento para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar. Esta combinación permite abordar el objetivo general y los específicos desde distintas dimensiones, fortaleciendo el análisis técnico, ambiental y contextual del estudio. De acuerdo con Molano y Cárdenas (2020), el enfoque mixto integra la complementariedad y triangulación entre ambos tipos de datos, logrando una evaluación integral que facilita la comprensión de aspectos técnicos, ambientales y contextuales en investigaciones científicas.

Desde el enfoque cuantitativo, se recopilaron y analizaron datos relacionados con las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua, lo que permitió dimensionar su disponibilidad como recurso biomásico y para la producción de bioetanol (objetivo específico 1). Asimismo, se describieron y compararon los métodos de pretratamiento aplicables a la biotransformación de esta especie, evaluando su eficiencia, costo, impacto ambiental y aplicabilidad (objetivo específico 2). Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se formularon estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua en la producción de bioetanol, integrando la evidencia cuantitativa con el análisis técnico y contextual (objetivo específico 3).

Por su parte, el enfoque cualitativo se aplicó mediante observación directa y registro fotográfico durante la visita técnica en áreas del municipio de Gamarra, Cesar, con el propósito de documentar visualmente la proliferación del Jacinto de agua en los cuerpos hídricos asociados al río Magdalena. Esta información permitió contextualizar el impacto ambiental generado por la proliferación excesiva de la planta, evidenciado en la obstrucción del flujo hídrico, disminución del oxígeno disuelto y afectación de la biodiversidad acuática, además de los efectos sobre las actividades pesqueras y productivas locales.

5.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptivo y exploratorio, orientada a caracterizar las condiciones ecológicas y morfológicas del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y analizar su

potencial de aprovechamiento mediante procesos de biotransformación para la producción de bioetanol. Este tipo de estudio permite identificar las características, relaciones y tendencias del fenómeno en su contexto ambiental y productivo dentro del municipio de Gamarra, Cesar, aportando una comprensión técnica y contextual que sustenta la propuesta de estrategias sostenibles de aprovechamiento.

5.3. Alcance

El alcance de esta investigación es no experimental, transversal y de carácter descriptivo – bibliográfico, orientado a analizar el potencial agroindustrial del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) mediante procesos de biotransformación enfocados en su aprovechamiento sostenible como biomasa. Se considera no experimental, ya que no se manipulan variables del estudio, sino que se observan tal como ocurren en su contexto natural. Asimismo, es transversal, porque se desarrolla en un único momento temporal, lo que posibilita recopilar información actualizada y contextualizada. Finalmente es descriptivo – bibliográfico, debido a la revisión, comparación y análisis de fuentes científicas, técnicas y académicas relacionadas con los pretratamientos aplicables a la biomasa. Todo esto de acuerdo con lo establecido por Castro et al., (2023).

5.4. Diseño de la investigación

5.4.1. Población

En el contexto de la investigación, la población hace referencia al conjunto total de elementos, individuos u objetos que poseen una serie de características definidas previamente por el investigador y que resultan relevantes para el desarrollo del estudio. Este grupo constituye el universo sobre el cual se pretende obtener información o al que se desean aplicar los resultados. De acuerdo con Willie, (2024), la población se establece a partir de criterios específicos que permiten delimitar quienes o qué forman parte de ese universo de análisis, garantizando que los datos obtenidos sean congruentes con los objetivos planteados en la investigación.

La población documental de esta investigación está conformada por un total de 5.974 documentos académicos, identificados mediante una búsqueda sistemática en las bases de datos de Google Académico (3.028 documentos) y ScienceDirect (2.946 documentos). Estos documentos incluyen artículos científicos, artículos de revisión, estudios especializados que abordan específicamente los procesos de pretratamiento aplicados a la biomasa del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol. La población considerará trabajos que

analizan pretratamientos fisicoquímicos y biológicos, su eficacia en la degradación de componentes lignocelulósicos y su impacto en el rendimiento de la producción de bioetanol, abarcando también comparaciones entre los diferentes métodos.

La estrategia de búsqueda aplicada en ambas plataformas se basó en el uso de operadores booleanos y términos clave en español e inglés para ampliar la cobertura temática y geográfica de la información recopilada. Entre las palabras clave utilizadas se encuentran: “*Eichhornia crassipes*” OR “*Jacinto de agua*” OR “*Water hyacinth*” AND “*Biotransformación*” OR “*Biotransformation*” OR “*Biomasa*” OR “*Biomass*” AND “*Pretratamiento*” OR “*Pretreatment*” AND “*Bioetanol*” OR “*Bioethanol*”. Esta población documental representa el universo informativo sobre el cual se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión descritos en el siguiente apartado con el fin de conformar una muestra pertinente y alineada con los objetivos de esta investigación.

5.4.2. Muestra

La muestra de esta investigación fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, a partir de criterios de pertinencia temática, actualidad y disponibilidad del texto completo. A partir de una población total de 5.974 documentos académicos, se determinó una muestra compuesta por 360 artículos, distribuidos equitativamente entre ambas bases de datos: 180 artículos de Google Académico y 180 de ScienceDirect. Para definir el tamaño de la muestra se utilizó la siguiente fórmula estadística para poblaciones finitas.

Figura 5. *Formula de muestreo para poblaciones finitas*

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{d^2(N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

- **n**: tamaño de la muestra
- **N**: tamaño de la población
- **Z**: valor según el nivel de confianza (1.96 para el 95%)
- **p**: proporción estimada de éxito (se usa 0.5 cuando no se conoce)
- **q**= 1-p: proporción complementaria (también 0.5 si p=0.5)
- **d**: margen de error aceptado (0.05)

Nota. Tomado de Morillas (2007)

$n=?$

$Z=1.96$ (nivel de confianza del 95%) = $Z^2= 3.8416$

$p=0.5$

$e=0.05$

$N= 5974$

$$n = \frac{(3.84)(0.5)(0.5)(5974)}{(0.05)^2(5974-1)+(3.8)(0.5)(0.5)} = \frac{(3.84)(0.25)(5974)}{(0.0025)(5973)+(0.96)} = \frac{5735.04}{(0.0025)(5973)+0.96} = \frac{5735.04}{15,8925} = 360.86$$

El tamaño de la muestra se calculó aplicando la fórmula para poblaciones finitas, con un nivel de confianza del 95% ($Z= 1.96$), proporción estimada $p=0.5$ y margen de error del 5%. El resultado fue de 360.86, redondeado a 360.9 documentos. No obstante, para equilibrar la selección entre las dos bases de datos consultadas se trabajará finalmente con 360 artículos (180 de Google Académico y 180 de ScienceDirect). En la siguiente tabla se presentan los criterios utilizados para seleccionar la muestra documental a partir de la población total identificada.

Tabla 3. *Criterios de inclusión y exclusión*

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Documentos que aborden el Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) como biomasa para biotransformación y producción de bioetanol	Estudios que solo traten el Jacinto de agua con fines ornamentales o paisajísticos
Publicaciones que analicen procesos de pretratamiento y biotransformación en aplicaciones agroindustriales	Contenido duplicado en diferentes plataformas o sin revisión por pares
Documentos en español o inglés	Documentos en otros idiomas no traducibles o no comprensibles
Fecha de publicación entre el 2015 y 2025	Publicaciones anteriores al 2015
Publicaciones con respaldo metodológico y citación académica adecuada	Fuentes no científicas o con baja calidad investigativa (blogs, páginas web, prensa, entre otros)

Nota. Elaboración propia (2025).

5.5. Instrumentos de recolección de datos

En cuanto a la recolección de datos Medina et al., (2023) destacan que se trata de un proceso fundamental en la investigación que implica la recopilación sistemática y estructurada de información mediante diversas técnicas e instrumentos, tales como la observación, la encuesta, la entrevista y el análisis documental. Estos instrumentos, que pueden ser cuestionarios, guía de entrevistas o fichas de observación, deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar la validez, confiabilidad y precisión de los datos, para fortalecer la calidad científica del estudio.

Dado que es un enfoque mixto y diseño no experimental, se emplean técnicas de recolección de datos de tipo documental y bibliográfica, orientadas a obtener información confiable, actualizada y pertinente para el análisis del potencial agroindustrial del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).

Las principales técnicas utilizadas son:

- **Revisión documental:** Se examinarán fuentes secundarias como artículos científicos, informes técnicos, tesis de posgrado, libros especializados y normativas nacionales e internacionales relacionadas con el manejo de Jacinto de agua, procesos de biotransformación, aprovechamiento de biomasa y sostenibilidad agroindustrial.
- **Análisis bibliométrico exploratorio:** Se realizará una exploración de bases de datos académicas con el fin de identificar tendencias, vacíos temáticos y enfoques predominantes en el tratamiento del Jacinto de agua como recurso alternativo.
- **Observación:** Como técnica cualitativa en campo, se empleará la observación directa en zonas del municipio de Gamarra, Cesar, con presencia significativa del Jacinto de agua en cuerpos hídricos asociados al río Magdalena, Durante esta actividad se realizarán registros fotográficos con el fin de documentar el estado real de la proliferación de la planta, su densidad, cobertura vegetal y posibles efectos.

5.6. Análisis y tabulación de datos.

En cuanto al análisis y tabulación de datos, Rivadeneira y Loor (2025) explican que la tabulación consiste en organizar y resumir los datos en tablas o matrices que permitan identificar patrones y relaciones entre las variables estudiadas. Posteriormente, el análisis aplica técnicas estadísticas y descriptivas para interpretar estos datos de manera que se puedan responder las preguntas de investigación de forma rigurosa y válida, tomando en cuenta los desafíos actuales que plantean las nuevas fuentes y volúmenes de datos.

Los datos recolectados durante la investigación serán organizados y sistematizados mediante el uso de una matriz Prisma elaborada en Microsoft Excel. En esta se incluirá la información documental proveniente de la revisión bibliográfica y estudios de caso, se consignarán datos como: autor (es), año de publicación, título de documento, aporte al tema, observaciones generales y fuente consultada,

Esta organización permitirá clasificar la información según tres ejes principales:

- 1. Contextualización:** Características del Jacinto de agua, su comportamiento ecológico, zonas de proliferación y disponibilidad como biomasa.
- 2. Metodología:** Procesos de biotransformación utilizados en estudios previos (pretratamientos, métodos de procesamiento, tecnologías aplicadas)
- 3. Resultados:** Procesos de pretratamiento aplicables al municipio de Gamarra, Cesar, eficiencia de estos procesos e impacto ambiental y viabilidad económica.

Adicionalmente, se incorporará un componente de observación directa en el municipio de Gamarra, Cesar, principalmente en áreas aledañas al río Magdalena, donde se evidencia una notable presencia del Jacinto de agua. Durante la visita de campo, se realizarán registros fotográficos con el fin de documentar la magnitud de la proliferación, el tipo de cobertura vegetal y los posibles impactos sobre el entorno natural e infraestructura.

Las imágenes obtenidas serán analizadas cualitativamente, permitiendo identificar zonas críticas de acumulación, cambios de estado de la vegetación y sectores con potencial para el aprovechamiento biomásico. Este análisis visual complementará la información documental, fortaleciendo la comprensión del fenómeno desde una perspectiva local y empírica. Ambos tipos de datos, documentales y observacionales se integrarán para sustentar la caracterización del *Eichhornia crassipes* y evaluar su viabilidad como recurso agroindustrial, en consonancia con los objetivos de esta monografía.

5.7. Procedimiento

El desarrollo de esta investigación se llevará a cabo mediante una serie de acciones diferenciadas según cada uno de los objetivos específicos propuestos, permitiendo organizar, recolectar y analizar la información de forma sistemática. A continuación, se describen las fases correspondientes a cada objetivo.

Objetivo específico 1:

Identificar las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua que influyen en su disponibilidad como recurso para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar.

1. Revisión bibliográfica:

Se realizará una revisión bibliográfica exhaustiva de fuentes científicas, técnicas y académicas relacionadas con la morfología, ecología y proliferación del Jacinto de agua. Priorizando artículos indexados, tesis, informes técnicos y documentos disponibles en bases de datos. La información recopilada será organizada y clasificada temáticamente según variables de estudio, lo que permitirá comparar resultados entre diferentes investigaciones y determinar los patrones comunes observados en contextos tropicales similares al municipio de Gamarra, Cesar.

2. Revisión normativa y contextual:

Se revisaron estudios en ecosistemas acuáticos internacionales y nacionales, así como del Caribe Colombiano, que abordaron el comportamiento y expansión del Jacinto de agua en condiciones similares a las de Gamarra, Cesar.

Además, como referencial principal se tomará el Plan Nacional para la Prevención, el Control y el Manejo de Especies Introducidas, Trasplantadas e Invasoras del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022), que continúa vigente como documento base para la gestión de especies invasoras en Colombia. Aunque esta normativa ha sido complementada con diversas resoluciones y planes sectoriales posteriores, no ha sido reemplazada formalmente, manteniendo su importancia como referencia para la prevención y control de especies invasoras.

3. Observación directa en campo:

Se realizará una visita técnica a zonas ribereñas del municipio de Gamarra, específicamente a sectores del río Magdalena donde el Jacinto de agua tiene presencia significativa (**ver anexo 1**). Durante la visita se tomarán evidencias fotográficas sobre la cobertura vegetal, densidad de la planta, características de agua y las condiciones ambientales del entorno. Estos registros se emplearán como evidencia documental que facilitará la validación de los hallazgos en campo y complementará las descripciones realizadas por el equipo investigador.

La intención de los registros fotográficos será aportar un soporte metodológico al análisis, lo que permitirá visualizar la magnitud de la proliferación del Jacinto de agua y así mismo generar comparaciones para futuras investigaciones o intervenciones

ambientales. Así, las imágenes no se limitarán a ser una ilustración, sino que servirán como un recurso de apoyo para la interpretación y discusión de los resultados.

4. Sistematización e interpretación:

Se integrarán los datos obtenidos de la visita con los hallazgos de la revisión documental. También, Se elaborará un análisis descriptivo y comparativo para establecer los factores ecológicos y morfológicos que inciden en la disponibilidad del Jacinto de agua como biomasa.

Objetivo específico 2:

Comparar los métodos de biotransformación aplicables al Jacinto de agua con énfasis en procesos biotecnológicos que permitan su valorización en productos agroindustriales.

1. Revisión bibliográfica especializada:

Se seleccionarán estudios que documenten los principales pretratamientos aplicados al Jacinto de agua, con énfasis en procesos físicos, químicos y fisicoquímicos vinculados a la producción de bioetanol.

2. Contextualización territorial:

A partir del conocimiento del territorio, la observación directa en campo y los métodos identificados, se realizará una articulación con las condiciones técnicas y productivas del municipio de Gamarra, con el fin de evaluar cuáles pretratamientos son más viables en el contexto local, teniendo en cuenta los recursos, infraestructura y capacidades productivas.

3. Construcción de tablas comparativas:

1. Matriz de Leopold (criterios ambientales):

La matriz de Leopold, propuesta originalmente por (Leopold et al., 1971) se ha convertido en una herramienta estándar para evaluar impactos ambientales al combinar magnitud e importancia de los efectos ambientales en una matriz de interacciones. Se utilizará para valorar los impactos ambientales asociados a cada pretratamiento del Jacinto de agua. Cada subcriterio como impacto

ambiental, consumo de energía, generación de residuos y emisiones se calificarán con dos parámetros:

- **M (Magnitud):** escala de -10 a + 10, representa la intensidad del impacto, es decir, negativo = desfavorable, positivo = favorable.
- **I (Importancia):** escala de 1 a 5, refleja el nivel de relevancia del impacto en el contexto local.

El valor ambiental se obtendrá mediante el producto $M \times I$, que genera un puntaje ponderado para cada subcriterio. Posteriormente, con el fin de facilitar la comparación entre los diferentes pretratamientos, los valores resultantes se normalizarán en una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde al impacto ambiental más favorable y 5 al más desfavorable. Este proceso homogeniza los resultados y permitirá realizar un análisis comparativo objetivo entre alternativas, destacando aquellas que ofrecen mayores ventajas en términos de sostenibilidad y menor afectación ambiental.

Según Belalcazar et al., (2025) una forma de facilitar la interpretación de estos puntajes es normalizarlos, dividiendo los resultados obtenidos entre los resultados de la situación de referencia. Es como comparar los resultados con los de un individuo promedio. La normalización convierte unidades complejas en fracciones de los resultados de referencia por categoría de impacto, lo cual brinda una idea más clara de cuanto contribuye un producto en comparación con el promedio.

Figura 6. *Formula de normalización.*

$$\text{Normalizado} = 1 + 4 \cdot \frac{\text{Puntaje} - \text{Mínimo}}{\text{Máximo} - \text{Mínimo}}$$

Nota. Tomado de Pre Sustainability (2014).

Para la adaptación de la Matriz de Leopold a los métodos de pretratamiento, se definieron criterios ambientales que permiten valorar los impactos ambientales a cada tipo. Los criterios seleccionados fueron los siguientes:

- **Uso del agua:** cantidad de recurso hídrico requerido durante la operación del pretratamiento, considerando tanto el consumo directo como el necesario para etapas de lavado o enfriamiento.
- **Consumo de energía:** cantidad de energía eléctrica o térmica demandada en kWh/Kg de biomasa para mantener las condiciones de operación, expresada de forma comparativa entre tratamientos.

Químicos	Pretratamiento ácido	I	M							
	Pretratamiento alcalino	I	M	I	M					
	Proceso Organosolv	I	M	I	M	I	M	I	M	
	Pretratamiento con peróxido de H ₂ O ₂					I	M	I	M	I
Fisicoquímicos	Tratamiento hidrotérmico	I	M	I	M	I	M	I	M	
	Explosión de vapor	I	M	I	M	I	M	I	M	

Nota. Tabla adaptada de Leopold et al., (1971).

2. Método Multicriterio de Decisión (MCDM):

Por otro lado, también se empleará el Análisis de Decisiones Multicriterio MCDM, por sus siglas en inglés, es una herramienta utilizada para la comparación y priorización de alternativas. Según Zdeb et al., (2023) el MCDM es una técnica que se aplica a problemas complejos de priorización, que combina elementos de matemática, gestión, informática, ciencias sociales y la económica. Lo que permite integrar criterios heterogéneos en un marco común de evaluación, lo que resulta fundamental en estudios de sostenibilidad y aprovechamiento de biomasa.

- Integra en una misma matriz los criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos.
- Los criterios técnicos y socioeconómicos se valoran en una escala de 1 a 5 (1 = muy desfavorable, 5= muy favorable).
- Cada grupo de criterios recibe una ponderación (%) definida de acuerdo a la importancia relativa en el marco de la producción de bioetanol a partir de Jacinto de agua en el municipio de Gamarra, Cesar. En este sentido, la viabilidad técnica (**30%**) se priorizo debido a que la eficiencia operativa y la factibilidad del proceso son determinantes para la escalabilidad del pretratamiento. La rentabilidad económica (**25%**) y el impacto ambiental (**25%**) recibieron un peso equivalente, en reconocimiento a la necesidad de equilibrar la sostenibilidad financiera con la minimización de los impactos negativos. Finalmente, la intensidad (**20%**), aunque relevante, se pondero ligeramente por debajo, al considerarse un criterio de apoyo que complementa la valoración técnica, económica y ambiental.

Intensidad (1-10)	20									
Impacto ponderado	100									

Nota. Adaptado de Zdeb et al., (2023)

La matriz DOFA o también conocida como SWOT en sus siglas en inglés, se define como una herramienta de análisis estratégico para identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, ha sido ampliamente aplicada en estudios recientes en Colombia para diagnosticar emprendimientos verdes y condiciones institucionales locales. Por ejemplo, Peña et al., (2025) usaron el SWOT para el desarrollo de negocios verdes en Caquetá, lo que demuestra su relevancia para contextos locales de sostenibilidad y producción agroindustrial.

Con el fin de complementar la evaluación multicriterio, se aplicará la Matriz DOFA a los diferentes métodos de pretratamiento del Jacinto de agua. Este análisis estratégico permitirá identificar las fortalezas y debilidades inherentes de cada pretratamiento, así como las oportunidades y amenazas derivadas del entorno local en el municipio de Gamarra, Cesar. De esta manera, la DOFA constituye una herramienta útil para proponer estrategias que potencien las ventajas y mitiguen los riesgos asociados a la implementación de los pretratamientos en la producción de bioetanol.

Tabla 6. Matriz DOFA para los métodos de pretratamiento para el Jacinto de agua en Gamarra, Cesar

Método de pretratamiento	Tipo	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Físicos	Molienda Mecánica				
	Extrusión				
	Irradiación con Microondas				
Químicos	Pretratamiento ácido				
	Pretratamiento alcalino				
	Proceso organosolv				
	Pretratamiento con peróxido de hidrógeno				

Fisicoquímicos	Tratamiento hidrotérmico				
	Explosión de vapor				

Nota. Fuente Autores.

Objetivo específico 3:

Proponer estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la producción de bioetanol, de acuerdo con los pretratamientos más destacados en la literatura y en el contexto del municipio de Gamarra, Cesar.

1. Revisión documental especializada:

Consultar artículos científicos, tesis y reportes técnicos sobre pretratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos aplicados al Jacinto de agua.

Identificar cuales han mostrado mayor eficiencia en la producción de bioetanol.

2. Selección de pretratamientos destacados:

Comparar ventajas y limitaciones de cada pretratamiento como rendimiento, costos, impacto ambiental y aplicabilidad.

Establecer cuáles son más viables en contextos similares al de Gamarra.

3. Análisis del contexto local:

Se considerarán factores del municipio: como disponibilidad de la biomasa, capacidad tecnológica, costos, infraestructura, impacto ambiental.

Relacionar estos factores con los pretratamientos identificados.

4. Diseño de propuestas de optimización:

La formulación de las estrategias de optimización se realizó con base en los resultados obtenidos de las matrices de Leopold, Evaluación Multicriterio y DOFA, integrando criterios técnicos, económicos y ambientales para cada pretratamiento. A partir de esta información se identificaron alternativas con mayor viabilidad global y se establecieron lineamientos de mejora adaptados al contexto productivo del municipio de Gamarra, Cesar.

El proceso se estructuró mediante el análisis comparativo y la adecuación local, en el que se correlacionaron los resultados de desempeño con las condiciones reales de infraestructura, recursos energéticos y capacidades tecnológicas del territorio. La matriz DOFA permitió identificar factores internos y externos que influyen en la implementación, sirviendo como base para formular estrategias orientadas a optimizar la eficiencia energética, reducir costos operativos y fortalecer la sostenibilidad ambiental de los procesos.

5.8. Hipótesis

5.8.1. Hipótesis Nula

Los métodos de pretratamiento aplicados al Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) no difieren de manera significativa en cuanto a eficiencia y aplicabilidad para la producción de bioetanol, de acuerdo con la evidencia reportada en la literatura.

5.8.2. Hipótesis Alternativa

Los métodos de pretratamiento aplicados al Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presentan diferencias significativas en eficiencia y aplicabilidad para la producción de bioetanol, según lo documentado en la literatura científica disponible.

5.9. Variables

En esta investigación, las variables son esenciales para entender cómo los diferentes métodos de pretratamiento influyen en la biotransformación del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol. Las variables independientes se enfocarán en los pretratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos aplicados, mientras que las variables dependientes reflejarán los resultados obtenidos del proceso, como el rendimiento, la cantidad de azúcares reductores y los cambios estructurales en la biomasa. Por lo que, esta clara diferencia permitirá analizar la eficiencia y viabilidad de cada método, y cuál de estos puede contribuir al desarrollo agroindustrial y a la mitigación de los impactos generados por la planta en el municipio.

Tabla 7. Variables independientes y dependientes.

Variables Independientes	Variables dependientes
Tipo de pretratamiento aplicado: físico, químico y fisicoquímico.	Cantidad de azúcares reductores obtenidos después del tratamiento.

Condiciones específicas del pretratamiento: Temperatura, pH, concentración de reactivos y tiempo del proceso.	Rendimiento en la producción de bioetanol: concentración de bioetanol producido volumen de bioetanol producido
Métodos específicos dentro de cada tipo de pretratamiento: Explosión de vapor, pretratamiento con ácido diluido...	Eficiencia del proceso: Biomasa inicial Bioetanol producido
	Efecto sobre la biomasa: degradación de la lignina pérdida de celulosa

Nota. Elaboración propia (2025).

6. DESARROLLO DEL TEMA.

6.1. Resultados

6.1.1. Objetivo específico 1: Identificar las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua que influyen en su disponibilidad como recurso para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar.

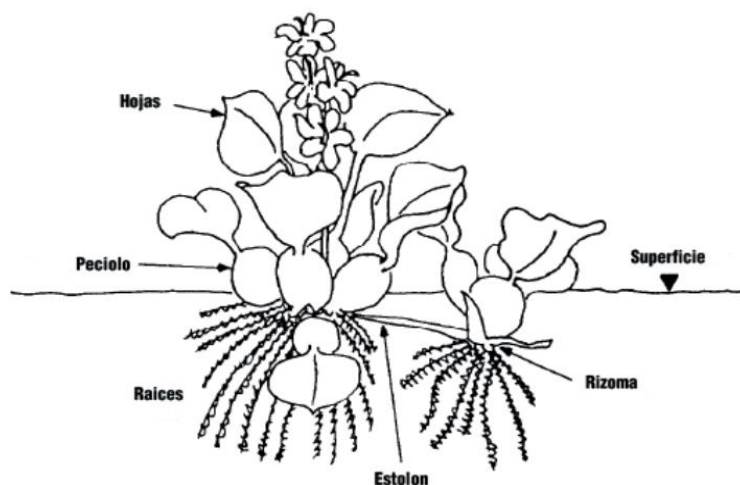
Características Morfológicas

El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) es una planta acuática flotante perteneciente a la familia Pontederiaceae, caracterizada por su alta adaptabilidad en ambientes con abundancia de nutrientes. Presenta hojas de color verde intenso con pecíolos inflados que funcionan como cámaras aeríferas, proporcionando flotabilidad y resistencia sobre la superficie del agua de acuerdo con lo expuesto por E. Verdejo et al., (2006). Además, Carreño y Rodríguez (2019) describen que las hojas son de forma ovalada, con una longitud promedio de 10 a 15 centímetros, y su inflorescencia se compone de racimos de flores de tonalidades violáceas o azuladas, un rasgo distintivo de la especie.

El sistema radical está constituido por raíces fibrosas que pueden alcanzar hasta 30 centímetros de longitud, lo que favorece la absorción de nutrientes disueltos en el agua contaminada o eutrofizada. Según Bachiller (2019), esta estructura radicular permite una rápida captación de materia orgánica y metales pesados, facilitando su crecimiento y propagación. De acuerdo con Afanasjeva et al., (2017) y Awasthi et al., (2013) destacan que la planta contiene una base lignocelulósica conformada por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes esenciales para la producción de bioetanol debido a su potencial de conversión en azúcares fermentables.

Durante las observaciones de campo realizadas en el municipio de Gamarra se evidenciaron ejemplares con hojas de gran tamaño, raíces densas, lo que indica una adaptación significativa a las condiciones del entorno (ver Anexo 1). Estas características morfológicas confirman que la especie constituye una fuente de biomasa lignocelulósica disponible y viable para procesos de producción de bioetanol. Adicionalmente, para reforzar la comprensión de la estructura anatómica de la especie, se incluye el esquema morfológico que ilustra partes principales del Jacinto de agua (ver Figura 7), facilitando la identificación visual de hojas, pecíolos, raíces, rizomas y estolones.

Figura 7. Esquema morfológico del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).



Nota. Tomado de Lara y Martelo (2012).

Características Ecológicas

El Jacinto de agua prospera principalmente en ambientes tropicales y subtropicales donde predomina las altas temperaturas, la radiación solar constante y la abundancia de nutrientes. De acuerdo con Harun et al., (2021) esta especie se reproduce con mayor rapidez en aguas eutrofizadas con altos niveles de nitrógeno y fósforo. En el municipio de Gamarra, estas condiciones se presentan debido a la concentración de residuos agrícolas y domésticos en los márgenes del río Magdalena, que actúan como fuente directa de nutrientes para su desarrollo.

Además, Huamani et al., (2021) mencionan que esta especie cumple un rol ambiental positivo al contribuir con procesos de fitorremediación, ya que es capaz de retener contaminantes y mejorar la calidad del agua. Sin embargo, Karouach et al., (2022) advierten que su proliferación excesiva genera graves impactos ecológicos, como la reducción del oxígeno disuelto y la alteración de los ecosistemas acuáticos. En este contexto, el aprovechamiento energético aparece como una alternativa sostenible que permite transformar una problemática ambiental en un recurso energético renovable.

Esta iniciativa se encuentra en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la Organización de las Naciones Unidas (2015), en especial con los objetivos relacionados con la energía asequible y contaminante, acción por el clima y la producción sostenible. Asimismo, Ruggerio, (2021) argumenta que el aprovechamiento de especies invasoras

dentro de procesos de valorización energética se alinea con los principios de bioeconomía circular, al promover el uso eficiente y responsable de los recursos naturales.

Características de Proliferación

El Jacinto de agua es reconocido como una de las especies invasoras de crecimiento más acelerado del mundo. De acuerdo Harun et al., (2021) esta planta bajo condiciones ambientales favorables puede duplicar su biomasa en menos de quince días. A su vez, Gajendra et al., (2020) destacan que su capacidad de reproducción vegetativa, mediante estolones, le permite expandirse de manera continua incluso en cuerpos de agua con flujo mínimo. Además, Monroy et al., (2022) complementan que las semillas de esta especie pueden mantenerse viables durante largos periodos, lo que amplifica su potencial de colonización.

Durante la visita realizada, se constató que los afluentes conectados al río Magdalena, presentan una cobertura abundante, con extensas superficies invadidas por la planta (ver Anexo 1). Esta evidencia confirma que la biomasa está disponible de manera constante y que su extracción no requiere esfuerzos adicionales, factores que incrementan su potencial como materia prima para procesos biotecnológicos de producción de bioetanol.

En conjunto, las características morfológicas, ecológicas y de proliferación del Jacinto de agua observadas en el municipio de Gamarra evidencian su alta adaptabilidad a las condiciones locales y su notable capacidad de regeneración. Durante la visita a campo se constató la presencia abundante de la especie en los afluentes conectados al río Magdalena, con extensas superficies cubiertas por la planta, lo que demuestra su establecimiento permanente y la disponibilidad constante de biomasa en la zona. Estas condiciones confirman que el Jacinto de agua representa una fuente de materia prima lignocelulósica accesible y sostenible, con un alto potencial para ser aprovechada en procesos biotecnológicos orientados a la producción de bioetanol.

6.1.2. Objetivo específico 2: Comparar los métodos de biotransformación aplicables al Jacinto de agua con énfasis en procesos biotecnológicos que permitan su valorización en productos agroindustriales.

Para el análisis comparativo de los métodos de pretratamiento físico, químico y fisicoquímico aplicables al Jacinto de agua en el municipio de Gamarra, Cesar, se emplearon tres matrices analíticas fundamentales: la Matriz de Leopold, la Matriz de Decisión Multicriterio (MCDM) y la matriz DOFA. Cada una contribuyo a evaluar los aspectos ambientales, técnicos, económicos y estratégicos necesarios para seleccionar las alternativas más viables para la producción sostenible de bioetanol.

• Métodos Físicos:

Molienda Mecánica

La molienda mecánica es un pretratamiento físico que permite reducir el tamaño de partícula del Jacinto de agua, favoreciendo la biotransformación y el acceso de las enzimas durante la hidrólisis. Su evaluación ambiental se realizó mediante la Matriz de Leopold, asignando valores de magnitud (M) e importancia (I) para determinar el efecto ambiental de cada criterio.

Tabla 8 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por molienda mecánica mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	0	1	0	No requiere consumo de agua en ninguna etapa del proceso, lo que reduce significativamente el impacto sobre los recursos hídricos. Carreño y Rodríguez (2019) destacan que los procesos físicos secos minimizan la demanda hídrica, mientras que Krátký (2022) señala que este tipo de operación evita el tratamiento de efluentes líquidos.
Consumo de energía	-3	3	-9	Presenta un consumo moderado de energía eléctrica, principalmente por el accionamiento del molino. Según Pérez et al., (2022), el requerimiento energético depende del tamaño de la partícula deseado. Asimismo, Krátký (2022) coincide en que, aunque implica energía mecánica, resulta más eficiente que los tratamientos térmicos o químicos.
Generación de residuos	-1	1	-2	Los residuos generados son sólidos inertes, principalmente polvo vegetal, sin presencia de compuestos tóxicos. según Krátký (2022) afirma que este material puede reincorporarse al proceso como fuente de biomasa y Di Domenico et al., (2025)resaltan que no se genera lixiviados ni efluentes contaminantes.
Impacto en el suelo	0	1	0	Puede producir partículas suspendidas durante la operación, aunque son controlables con sistemas de filtración. Por lo que Ospino et al., (2020) destacan que los métodos físicos secos

				presentan baja huella ecológica y que Luzardo et al., (2023) sostienen que su aplicación no altera las propiedades del entorno ni que requiere de disposición final.
Impacto en el aire	-2	2	-4	Puede generar partículas finas durante la operación, pero su efecto es controlable con sistemas de filtración. Además, Venegas et al., (2024) indican que las emisiones derivadas son mínimas, mientras que Galbe y Wallberg (2019) resaltan que el proceso mantiene bajos niveles de contaminación atmosférica.
Emisiones atmosféricas	-2	2	-4	Las emisiones indirectas provienen del consumo eléctrico del equipo. Por lo que Venegas et al., (2024) estiman que estas son reducidas frente a los procesos térmicos, también Galbe y Wallberg (2019) confirman que la molienda genera una baja huella de carbono.
Beneficio productivo	5	4	+20	Incrementa la superficie específica de la biomasa, mejorando la acción enzimática y la conversión de celulosa en azúcares fermentables. Puesto que, Luzardo et al., (2023) reportan mayor accesibilidad estructural tras la molienda y Galbe y Wallberg (2019) evidencian que este método optimiza la hidrólisis y reduce los costos enzimáticos.

Nota. Autores (2025).

Extrusión

La extrusión representa un proceso de pretratamiento físico que somete la biomasa a altas cizalladuras mecánicas y modificaciones térmicas para aumentar la accesibilidad de la celulosa. Su evaluación ambiental se realizó mediante la Matriz de Leopold, asignando valores de magnitud (M) e importancia (I) para determinar el efecto ambiental de cada criterio.

Tabla 9 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por extrusión mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-1	2	-2	El uso de agua es mínimo, empleado únicamente para el enfriamiento del material extruido. Según Jurisic et al., (2015) y Ai et al., (2020), la extrusión trabaja con alta carga de sólidos, reduciendo el uso de agua en comparación con otros tratamientos.
Consumo de energía	-7	5	-35	La extrusión demanda un alto consumo energético por las presiones y temperaturas requeridas. Por lo que Ai et al., (2020) señalan que este proceso implica elevados requerimientos térmicos y eléctricos, aunque su eficiencia estructural compensa parcialmente este gasto. De forma similar Fu et al., (2021) destacan que los pretratamientos de alta energía como la extrusión, aumentan la accesibilidad de la celulosa y mejora el rendimiento en la conversión de biomasa a bioetanol.
Generación de residuos	-2	2	4	Los residuos generados son principalmente fibras y sólidos biodegradables de fácil manejo. Por eso mismo Jurisic et al., (2015) y Mankar et al., (2021) coinciden en que la extrusión no genera

				efluentes líquidos ni subproductos tóxicos, lo que reduce la carga ambiental y facilita su gestión.
Impacto en el suelo	0	1	0	No se evidencian descargas líquidas ni infiltraciones, por lo que el impacto en el suelo es nulo. Este comportamiento coincide con lo descrito por Ai et al., (2020), quienes indican que la operación en seco minimiza el riesgo de contaminación del suelo. Además, Luzardo et al., (2023) señalan la extrusión, cuando se maneja adecuadamente no genera residuos ni líquidos ni sólidos que puedan afectar la calidad del suelo.
Impacto en el aire	0	1	0	Se liberan vapores de agua no tóxicos derivados del calentamiento del material
Emisiones atmosféricas	-3	3	-9	La principal fuente de CO ₂ proviene de la generación de energía eléctrica consumida durante el proceso. Por lo que Jurisic et al., (2015) y Mankar et al., (2021) coinciden en que el consumo energético de la extrusión constituye a emisiones indirectas de CO ₂ . Por ello, la implementación de fuentes de energía renovable y tecnologías eficientes en el consumo pueden mitigar significativamente estas emisiones.
Beneficio productivo	+7	5	+35	La extrusión mejora significativamente el beneficio productivo al modificar la estructura de la biomasa, facilitando la posterior hidrólisis enzimática y aumentando la liberación de azúcares fermentables, lo que optimiza la producción de bioetanol. Por esto, Zheng y Rehmann, (2014) destacan la capacidad de la extrusión en romper la matriz lignocelulósica de manera eficiente, mientras que Jurisic et al., (2015) confirman que este pretratamiento incrementa el rendimiento y uniformidad del material procesado. Además, Duque (2017) señala que la extrusión permite procesos continuos y controlados, lo que mejora la productividad y rentabilidad técnica en la producción de biocombustibles.

Nota. Autores (2025).

Irradiación con Microondas

El pretratamiento con microondas utiliza energía electromagnética para generar calentamiento rápido y penetrante en la biomasa, provocando la ruptura de la estructura lignocelulósica de manera más eficiente que métodos convencionales. Su evaluación ambiental se realizó mediante la Matriz de Leopold, asignando valores de magnitud (M) e importancia (I) para determinar el efecto ambiental de cada criterio.

Tabla 10 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por irradiación con microondas mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-1	2	-2	El uso del agua en la irradiación con microondas es mínimo, ya que este método emplea principalmente en combinación con reactivos químicos para mejorar la eficiencia del pretratamiento. De acuerdo con Mikulski y Kłosowski, (2022) el uso exclusivo de agua en el

				tratamiento asistido por microondas no es suficiente para lograr una deslignificación efectiva. De manera similar Chaturvedi y Verma, (2013) señalan que este proceso reduce significativamente el consumo de agua en comparación con métodos convencionales de pretratamiento térmico, ya que el calentamiento se realiza principalmente sobre la biomasa.
Consumo de energía	-6	4	-24	El consumo de energía en la irradiación con microondas es alto, ya que los equipos industriales requieren potencias entre 600 a 1.200 W para lograr una deestructuración efectiva de la biomasa. Según, Hoang et al., (2021) señalan que, si bien el tiempo de pretratamiento es reducido entre 5 y 30 minutos, la alta demanda de energía de los equipos representa un aspecto crítico en la evaluación ambiental del proceso. De manera similar Aguilar-Reynosa et al., (2017) indican que, aunque el microondas genera un calentamiento eficiente, la potencia durante la operación implica un mayor consumo de electricidad.
Generación de residuos	0	1	0	El proceso es un tratamiento limpio que no genera residuos sólidos ni líquidos significativos. Por lo que, Fernandes et al., (2023) señalan que esta tecnología aplicada a biomasa lignocelulósica evita la generación de efluentes contaminantes y no producen humos, vapores tóxicos o residuos secundarios. De manera similar, Hoang et al., (2021) indican que el tratamiento asistido por microondas satisface requisitos de la química verde, al no requerir el uso de solventes o químicos adicionales que generen residuos, lo que lo posiciona como una opción ambientalmente sostenible.
Impacto en el suelo	0	1	0	No se evidencian descargas líquidas ni infiltraciones contaminantes a partir del proceso de irradiación con microondas, por lo que el impacto en el suelo es nulo, confirmando lo expuesto por Jablonowski et al., (2022) señalan que este pretratamiento si se opera en condiciones controladas no genera efluentes que pueden infiltrarse al suelo cuando el proceso se realiza en reactores sellados. De manera similar, Hoang et al., (2021) señalan que al ser un proceso confinado no genera pérdida de líquidos al ambiente, por lo que no representa un riesgo de contaminación.
Impacto en el aire	-1	2	-2	Se liberan vapores de agua no tóxicos derivado del calentamiento de la biomasa. De acuerdo con (Hassan et al., 2018) señalan que la irradiación con microondas genera principalmente vapor de agua como subproducto, sin producir emisiones significativas. Como complemento Hong et al., (2021) también mencionan que no el proceso no libera contaminantes atmosféricos.
Emisiones atmosféricas	-3	3	9	Las emisiones atmosféricas de CO ₂ provienen del consumo de energía eléctrica durante el proceso. Aunque no se generan emisiones directas de gases contaminantes, la alta demanda energética se traduce en emisiones indirectas significativas. Lo planteado por Amini et al., (2021) indican que el calentamiento por microondas puede reducir el consumo de energía en 60 – 80 %, lo que disminuye las emisiones de CO ₂ en un 25% si se emplean fuentes de energía renovable. Sin embargo, Hoang et al., (2021) señalan que cuando la energía viene de fuentes convencionales, el alto consumo eléctrico del sistema resulta en emisiones indirectas considerables.

Beneficio productivo	+6	5	+30	Proporciona un beneficio productivo excelente mediante la ruptura eficiente de fibras lignocelulósicas. En consecuencia Chaturvedi y Verma, (2013) demuestran que el pretratamiento mejora el rendimiento de azúcares fermentables entre un 4 a 5.8 veces comparado con biomasa sin tratar. De manera similar Mikulski y Kłosowski, (2022) confirman rendimientos de glucosa superiores al 46% de conversión de celulosa.
-----------------------------	-----------	----------	------------	---

Nota. Autores (2025).

- **Métodos químicos**

Pretratamiento ácido

El pretratamiento ácido utiliza ácidos diluidos comúnmente H_2SO_4 , HCl o CH_3COOH en concentraciones entre 0.2 % y 4% y temperaturas de 130 – 210 °C para solubilizar la hemicelulosa y mejorar la accesibilidad de la celulosa. Su evaluación ambiental se realizó mediante la Matriz de Leopold, asignando valores de magnitud (M) e importancia (I) para determinar el efecto ambiental de cada criterio.

Tabla 11 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento ácido mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-5	4	-20	Requiere de un alto consumo de agua, ya que necesita preparar soluciones diluidas de ácido a concentraciones entre 0.2 % y 4% w/w, además de requerir enjuagues posteriores para remover residuos ácidos. De acuerdo a lo planteado por Baruah et al., (2018) señalan que típicamente utiliza ratios de líquido – sólido entre 4:1 y 10:1, significativamente mayores que otros métodos. De igual forma, Oriez et al., (2019) confirman que se requieren grandes volúmenes de agua particularmente en etapas de lavado para remover inhibidores.
Consumo de energía	-4	3	-12	El consumo de energía es moderado, ya que el proceso requiere mantener temperaturas entre 130 – 210 °C durante periodos prolongados para lograr una hidrólisis efectiva. Especialmente, Baruah et al., (2018) señalan que el pretratamiento requiere energía térmica considerable para alcanzar y mantener estas temperaturas en reactores de volúmenes grande. En concordancia con lo anterior, Solarte-Toro et al., (2019) confirman que los costos energéticos del pretratamiento ácido son significativos debido a la necesidad de calentamiento prolongado.
Generación de residuos	-6	5	-30	Genera lodos ácidos que requieren neutralización antes de su disposición final, representando un residuo significativo. Así pues, Baruah et al., (2018) señalan que la generación de los lodos ácidos es inevitable en estos procesos ya que contienen lignina solubilizada, ácido no reaccionado y compuestos inhibidores que deben ser removidos. También, Oladzad et al., (2024) confirman que los lodos resultantes del pretratamiento ácido necesitan

				neutralización con agentes alcalinos para ajustar el pH y permitir la disposición segura.
Impacto en el suelo	-5	4	-20	Representa un peligro significativo de contaminación del suelo en caso de fugas o mal manejo durante el proceso. Ante esto, Baruah et al., (2018) señalan que la corrosividad de los ácidos diluidos empleados puede causar deterioro de equipos y contenedores, aumentando el riesgo de derrames que contaminen el suelo con sulfatos, cloruros y residuos químicos. De igual forma, Mussatto (2016) confirma que, si los lodos ácidos se infiltran en el suelo sin neutralización previa, pueden alterar el pH, reducir la disponibilidad de nutrientes y afectar la microflora del suelo, representando un riesgo ambiental considerable que requiere de un control riguroso.
Impacto en el aire	-3	3	9	Libera vapores ácidos leves que requieren sistemas de captura para minimizar su emisión a la atmósfera. Por lo anterior, Brodeur et al., (2011) señalan que durante el proceso se generan vapores de ácido sulfúrico, clorhídrico y otros compuestos volátiles que, si no son capturados, pueden afectar la calidad del aire y la salud del personal. Además, esto confirma lo expuesto por Baruah et al., (2018) quienes confirman que se requiere de sistemas de neutralización o depuración para su eliminación antes de la emisión atmosférica.
Emisiones atmosféricas	-2	2	-4	Las emisiones son moderadas y se asocian principalmente a la energía consumida para mantener el control de temperatura durante la reacción. Particularmente, Oladzad et al., (2024) señalan que, aunque el pretratamiento ácido consume energía térmica moderada, esta energía es requerida para el calentamiento continuo lo que genera emisiones indirectas de CO ₂ . En referencia a esto, Brodeur et al., (2011) confirman que los sistemas de pretratamiento químico como ácido diluido presentan una huella de carbono moderada comparada con otros sistemas de pretratamiento químico.
Beneficio productivo	+8	5	+40	Proporciona un beneficio productivo excelente mediante la gran liberación y solubilización de hemicelulosa, mejorando significativamente la accesibilidad para la hidrólisis enzimática. Específicamente Oladzad et al., (2024) demuestran que el pretratamiento ácido a 140°C produce una conversión de celulosa del 71.4% después de 24 horas mejorando la hidrólisis enzimática en un 44%. En referencia a esto Porninta et al., (2024) confirman que bajo el pretratamiento con ácido sulfúrico diluido (3-4% w/v), la hemicelulosa se hidroliza rápidamente en monosacáridos con menos del 10% de sólidos no hidrolizados, logrando rendimientos de glucosa de hasta 32.7% el bagazo de caña, posicionando el pretratamiento como alternativa productiva para biotransformación de biomasa lignocelulósica.

Nota. Autores (2025).

Pretratamiento alcalino (NaOH o Ca (OH)₂)

El pretratamiento alcalino utiliza soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de calcio (Ca (OH)₂) para romper los enlaces Ester que unen la lignina a la hemicelulosa. Durante

este proceso, los iones hidroxilo (OH^-) causan la saponificación de los Ester linkages, lo que promueve la hinchazón de las partículas de biomasa, facilitando la solubilización de la lignina y la exposición de la celulosa a la hidrolisis enzimática. el NaOH es más efectivo debido a su mayor poder caustico, aunque ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es más económico y puede recuperarse fácilmente.

Tabla 12 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento alcalino (NaOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$) mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-6	4	-24	El pretratamiento requiere un consumo de agua muy alto para preparar soluciones diluidas de NaOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y enjuagues posteriores. Específicamente, Sánchez-Muñoz et al., (2021) reportan ratios sólido – líquido de 1:10, implicando grandes volúmenes de agua para asegurar el contacto uniforme con la biomasa. Además Liu et al., (2014) confirman que el proceso requiere de grandes volúmenes adicionales para lavado posterior y neutralización de residuos alcalinos, siendo el consumo superior al del pretratamiento ácido.
Consumo de energía	-4	3	-12	El consumo es moderado pues el proceso utiliza temperaturas muy bajas ($26\text{-}50^\circ\text{C}$) comparadas con otros métodos, aunque requiere de agitación y control térmico. Por lo que, Dhull y Maiti (2025) demuestran que el pretratamiento alcalino a temperatura ambiente es considerablemente más económico en términos energéticos, eliminando la necesidad de calentamiento externo y representando una ventaja sustancial. Asimismo, Kululo et al., (2025) confirman que el pretratamiento alcalino utiliza temperaturas y presiones significativamente menores comparadas con otros métodos químicos.
Generación de residuos	-6	5	-30	Genera residuos líquidos conocidos como “licor negro” que contienen lignina disuelta y NaOH no consumido, requiriendo tratamiento especializado. En particular, Qian et al., (2022) señalan que el licor negro del pretratamiento alcalino es un residuo significativo que generalmente requiere neutralización y procesamiento adicional. De forma correlativa, Hassan et al., (2018) confirman que una desventaja mayor del pretratamiento alcalino es la recuperación de los álcalis añadidos.
Impacto en el suelo	-5	4	20	Puede generar efectos negativos en el suelo si los residuos no se gestionan adecuadamente, debido al alto pH y a la presencia de iones de Na^+ o Ca^{2+} , los cuales pueden aumentar la salinidad, dispersar arcillas y reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales. De acuerdo con Oriez et al., (2019), explican que los efluentes alcalinos alteran la estructura edáfica y deben ser neutralizados para evitar degradación del suelo. De manera complementaria, Awoyale y Lokhat, (2021), reportan que el NaOH residual puede afectar la biota microbiana, disminuir la actividad enzimática del suelo y deteriorar su fertilidad si ocurre infiltración o disposición inadecuada.
Impacto en el aire	-3	3	9	El pretratamiento alcalino, según Karp et al., (2015), es medio-bajo debido a que el proceso, bajo condiciones industriales controladas, no promueve la emisión significativa de compuestos volátiles peligrosos ni gases tóxicos, especialmente si se utiliza equipos

				cerrados. No obstante, Zhou et al., (2015), advierten que, en situaciones de agitación intensa, incremento de temperatura o etapas de secado pueden generare aerosoles alcalinos, lo cual resalta la importancia de una ventilación adecuada y gestión responsable de residuos para minimizar riesgos de irritación respiratoria.
Emisiones atmosféricas	-2	2	4	Produce emisiones atmosféricas bajas cuando se implementa bajo condiciones de operación controladas y a bajas temperaturas, la cual se encuentra directamente relacionado con el consumo energético. En este sentido, Karp et al., (2015) explican que el uso de temperaturas suaves en la hidrolisis alcalina minimiza tanto la liberación de gases secundarios como la demanda eléctrica del sistema. Además, Kim et al., (2016) subrayan que las bajas demandas energéticas del pretratamiento reportadas en la literatura limitan la formación de emisiones atmosféricas como CO ₂ y otros compuestos volátiles.
Beneficio productivo	+8	5	40	Ofrece un beneficio productivo significativo, ya que mejora la accesibilidad de la celulosa y hemicelulosa al remover selectivamente la lignina, aumentando la eficiencia de la hidrolisis enzimática y el rendimiento de azúcares fermentables. Según Kim et al., (2016) el uso de NaOH puede incrementar la digestibilidad enzimática entre un 40% y 60 % en biomásas lignocelulósicas tratadas. De igual forma, Chen et al., (2021) demostraron que el preparamiento alcalino permite obtener mayores concentraciones de etanol, alcanzando hasta el 70.6 g L ⁻¹ sin necesidad de lavado o detoxificación adicional, lo que representa una ventaja operativa y productiva frente a otros métodos de pretratamiento.

Nota. Autores (2025).

Pretratamiento Organosolv

El pretratamiento Organosolv es un proceso químico que utiliza solventes orgánicos, como el etanol, metanol. Acetona o mezclas acuosas, bajo condiciones controladas de temperatura y presión para disolver selectivamente la lignina y parte de la hemicelulosa. Este método permite fraccionar la biomasa en corrientes de alta pureza, obteniendo una celulosa más accesible a la hidrolisis enzimática y una lignina de calidad superior, libre de compuestos inorgánicos y con alto valor comercial.

Tabla 13 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento organosolv mediante la Matriz de Leopold.

Criterion	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-2	3	-6	El proceso Organosolv requiere un volumen moderado de agua principalmente para el lavado de biomasa y la recuperación de solventes, lo que no constituye el factor crítico, pero sí es una necesidad operativa. Por lo que, Kululo et al., (2025) señalan que se emplea relaciones solido-liquido de 1:4 a 1:10 durante la etapa

				de extracción y lavado. Por otro lado, Nair et al., (2023) destacan que la reutilización de solventes puede reducir el consumo de agua en hasta un 30%.
Consumo de energía	-3	4	-12	Implica un consumo térmico moderado a alto, ya que las reacciones de solvolisis requieren elevadas temperaturas (120 – 200 °C) y la separación / recuperación del solvente demanda destilación o evaporación adicional. Según Kululo et al., (2025) mencionan que los rangos de operación típicos aumentan la demanda energética y, además, Nair et al., (2023) indican que la recuperación del solvente en circuitos cerrados representa un coste energético significativo.
Generación de residuos	-4	5	-20	Este proceso genera residuos químicos, como solventes usados y lignina soluble que debe recuperarse o valorizarse; aunque la fracción de residuo puede ser menor, la gestión del licor residual es relevante. De acuerdo con Vaidya et al., (2022) la extracción libera lignina y hemicelulosa hacia el líquido de extracción que debe tratarse
Impacto en el suelo	-4	5	-20	Produce principalmente un licor de extracción, De acuerdo con W. Sun et al., (2018) este licor está compuesto con alta carga de lignina disuelta y residuos solventes que exigen recuperación o tratamiento; sin gestión y recuperación eficiente del solvente y de la fracción líquida, el gasto operativo y el riesgo ambiental aumentan por la presencia de los compuestos orgánicos solubles. Asimismo, Nair et al., (2023) mencionan que la composición del licor y la necesidad de purgar para controlar impurezas implican tratamiento adicional o valorización de la lignina para minimizar los residuos.
Impacto en el aire	-4	5	-20	Puede implicar emisiones al aire debido a la volatilización de solventes orgánicos y la liberación de compuestos olorosos durante la extracción y recuperación del solvente. Además, Nair et al., (2023) señalan que la reutilización del solvente y la implementación de sistemas cerrados son críticas para minimizar la dispersión de vapores orgánicos. Por otro lado, Vaidya et al., (2022) informan que los desafíos técnicos en plantas piloto incluyen el control de emisiones atmosféricas derivadas de solventes de bajo punto de ebullición, lo que demuestra la necesidad de ventilación, captura de vapores y manejo adecuado de los gases de destilación.
Emisiones atmosféricas	-4	5	-20	Elevado consumo energético para mantener temperaturas de operación entre 120 -200 °C y para la destilación o evaporación del solvente, generando emisiones indirectas de CO ₂ vinculados a la demanda térmica. A partir de esto, Nair et al., (2023) señalan que la recuperación del solvente mediante destilación incrementa significativamente la demanda térmica del sistema, aumentando proporcionalmente la huella de carbono. Además, Vaidya et al., (2022) indican que los sistemas Organosolv presentan emisiones asociadas a la volatilización de solventes y al uso de vapor en circuitos cerrados. Finalmente, Yin et al., (2021) destacan que los procesos termoquímicos basados en solventes generan impactos atmosféricos principalmente ligados a la energía térmica requerida, reforzando la importancia del uso de energías de menor intensidad de carbono.

Beneficio productivo	+8	4	32	Ofrece un beneficio productivo elevado debido a su alta capacidad de deslignificación, lo que permite obtener una celulosa de mayor pureza y una lignina de calidad superior, apta para aplicaciones de alto valor en biorrefinerías. Además, Vaidya et al., (2022) señalan que este método mejora significativamente la eficiencia de la hidrólisis enzimática al reducir la recalcitrancia estructural de la biomasa. Por otro lado, Nair et al., (2023) destacan que la lignina recuperada mediante Organosolv presenta alta pureza y baja condensación, lo que incrementa su valor comercial y facilita su integración en cadenas de bioproductos.
-----------------------------	-----------	----------	-----------	--

Nota. Autores (2025).

Peróxido de Hidrogeno

El pretratamiento con peróxido de hidrogeno (H_2O_2) es un método oxidativo que aprovecha la capacidad del peróxido para generar especies reactivas principalmente radicales hidroxilo (OH) y perhidróxido (OOH) capaces de romper enlaces estructurales en la lignina y parcialmente en la hemicelulosa. Este proceso reduce la recalcitrancia de la biomasa al provocar la despolimerización y solubilización de la lignina, aumentando así la accesibilidad de la celulosa a la hidrólisis enzimática.

Tabla 14 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por peróxido de hidrogeno mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-2	3	-6	El pretratamiento con H_2O_2 emplea volúmenes moderados de agua para preparar soluciones diluidas y realizar posteriores. Por lo que, H. Zhang et al., (2019) reportan relaciones solido: liquido del orden 1:10 en AHP para asegurar contacto uniforme y eficacia del tratamiento. Además, Alencar et al., (2017) explican que la reutilización del fraccionado liquido puede reducir considerablemente el consumo de agua y de reactivos cuando se implementan ciclos de reciclaje del licor de extracción.
Consumo de energía	-2	3	-6	Presenta consumo energético moderado, ya que opera a bajas temperaturas y solo requiere de agitación y control térmico básico, lo que reduce la demanda respecto a métodos térmicos más intensivos. En primer lugar, H. Zhang et al., (2019) demostraron que el pretratamiento en condiciones suaves combinadas con aditivos permite altas eficiencias de sacarificación sin grandes aportes térmicos. Asimismo, Li et al., (2018) mostraron que la optimización de temperatura y tiempo en este tratamiento mejora la digestibilidad y reduce la necesidad de calentamientos prolongados, disminuyendo así la demanda energética global del proceso.
Generación de residuos	-1	2	-2	Genera una cantidad mínima de residuos, ya que el peróxido se descompone en agua y oxígeno, dejando pocos subproductos químicos y reduciendo la necesidad de tratamientos posteriores.

				Por otra parte, H. Zhang et al., (2019) demostraron que los procesos oxidativos con H ₂ O ₂ producen efluentes con baja carga orgánica y prácticamente sin compuestos tóxicos persistentes, debido a la degradación del peróxido durante la reacción. De igual modo, Li et al., (2018) confirmaron que el uso de H ₂ O ₂ bajo condiciones suaves genera licores residuales más limpios y con menor impacto ambiental en comparación con métodos ácidos o solventes orgánicos.
Impacto en el suelo	-1	2	-2	Conlleva un riesgo mínimo para el suelo, siempre que los derrames y efluentes sean controlados correctamente. En particular, A. K. Kumar y Sharma, (2017) señalan que los métodos oxidativos, presentan baja generación de subproductos persistentes que puedan infiltrarse en el suelo. En concordancia, Tareen et al., (2020) demuestran que la fracción residual tras el tratamiento con H ₂ O ₂ tiene una composición significativamente menos contaminante que los residuos de otros pretratamientos químicos.
Impacto en el aire	-2	2	-4	Presenta un impacto muy bajo sobre la calidad del aire, ya que su descomposición genera oxígeno como producto principal, sin liberar compuestos tóxicos o irritantes, solo puede generar incrementos de presión si se emplea en sistemas cerrados. Por consiguiente, H. Zhang et al., (2019) reportan que los procesos oxidativos con peróxido no producen gases nocivos ni emisiones volátiles significativas. Del mismo modo, Li et al., (2018) indican que la degradación del H ₂ O ₂ en condiciones de pretratamiento no genera compuestos atmosféricamente reactivos, lo que lo convierte en una opción con emisiones mínimas.
Emisiones atmosféricas	-2	2	-4	Las emisiones atmosféricas asociadas al pretratamiento con H ₂ O ₂ son bajas, ya que el proceso opera a temperaturas moderadas y requiere menos demanda térmica que otros métodos químicos, lo que se traduce en una menor generación indirecta de CO ₂ . En este sentido, (Ho et al., 2019) muestran en revisiones comparativas que los procesos oxidativos a temperaturas moderadas presentan menores consumos energéticos y, por ende, menores emisiones. Por otra parte, Osman et al., (2024) confirman mediante el Análisis de Ciclo de vida y análisis técnico-económico que la elección de condiciones de operación y la fuente energética determinan las toneladas de CO ₂ equivalentes, en escenarios con energía fósil la huella crece, mientras con energía baja en carbono se mantienen reducidas.
Beneficio productivo	+6	4	+24	Ofrece un beneficio productivo significativo al mejorar la accesibilidad de la celulosa gracias a la remoción parcial de lignina y hemicelulosa, lo cual incrementa las conversiones enzimáticas de azúcares fermentables. Por ejemplo, H. Zhang y Wu, (2023) reportan para la paja de trigo tratada con H ₂ O ₂ recuperaciones de celulosa del 97.5% hemicelulosa del 84.3% y remoción de lignina del 75.0 %, traduciendo esto en altos rendimientos de glucosa 552.7 mg/m y xilosa 223.6 mg/g tras hidrólisis. Asimismo, Gong et al., (2015) demostraron que la adición de H ₂ O ₂ a soluciones carbonatadas mejora la remoción de lignina y la digestibilidad enzimática del rastrojo de maíz, traduciendo la mejora en incrementos de glucosa.

Nota. Autores (2025).

- **Métodos Físicoquímicos:**

Tratamiento hidrotermal

El tratamiento hidrotermal, también conocido, consiste en someter la biomasa lignocelulósica a agua en estado líquido a altas temperaturas entre 160 - 240°C, y presiones elevadas, sin necesidad de añadir reactivos químicos. Bajo estas condiciones, el agua actúa como un catalizador que promueve la solubilización de la hemicelulosa, la deestructuración parcial de la lignina y la apertura de la matriz vegetal, aumentando la accesibilidad de la celulosa para etapas posteriores de hidrólisis.

Tabla 15 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por tratamiento hidrotermal mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-5	4	-20	El tratamiento hidrotermal requiere un consumo alto de agua, ya que la biomasa se somete a agua en estado líquido a elevada temperatura y presión, así como a vapor para facilitar la hidrólisis; en particular, según Scapini et al., (2021) el agua actúa no solo como reactivo, sino como medio de transporte de calor y solvente de hemicelulosa. De forma complementaria, Martín et al., (2022) indican que el tratamiento hidrotermal en agua líquida y vapor implica grandes volúmenes de agua para mantener la fase líquida/presión y realizar lavadores posteriores, lo cual eleva el factor de uso hídrico del proceso.
Consumo de energía	-6	4	-24	El tratamiento hidrotermal presenta un consumo de energía elevado, que requiere calderas de presión, generación de vapor y temperaturas de operación elevadas mayores o iguales a 160 °C, lo cual incrementa significativamente la carga térmica del proceso. Por ejemplo, Martín et al., (2022) detallan que la hidrólisis en agua caliente implica sistemas activos de vapor y recuperación de calor, resultando en un alto consumo de energía. Además, Rouabhia et al., (2025) compararon diferentes pretratamientos y concluyeron que el método hidrotermal demanda aproximadamente 70.85 kJ/g mucho mayor que otros métodos como microondas, lo que confirma su elevada exigencia térmica.
Generación de residuos	-3	3	-9	Produce residuos en forma de licor hidrolizado que contiene hemicelulosa solubilizada y compuestos orgánicos derivados de la biomasa. En este sentido, Martín et al., (2022) describen que el proceso libera azúcares, oligómero y extractivos que quedan disueltos en el licor líquido y requieren de gestión adecuada antes de su valorización o disposiciones. Asimismo, Paczkowski et al., (2023) reportan que estos efluentes contienen fracciones orgánicas y minerales lixiviados que incrementan la carga del tratamiento de aguas, por lo que deben manejarse bajo lineamientos ambientales.
Impacto en el suelo	-2	2	-4	Presenta un riesgo moderado sobre el suelo, ya que no emplea reactivos corrosivos y los posibles impactos dependen principalmente del manejo adecuado del licor hidrolizado. De

				manera específica, B. Zhang et al., 2023) indican que, con sistemas de manejo y tratamiento de licores apropiados, no se observan impactos edáficos persistentes en estudios piloto y a escala demostrativa. Asimismo, Kakar et al., (2022) señalan que la correcta gestión de licor hidrolizado mínima el potencial de carga contaminante y reduce el riesgo de afectación de parámetros del suelo como salinidad o contenido de compuestos fenólicos.
Impacto en el aire	-2	3	-6	Genera un impacto moderado en la calidad del aire por la liberación de vapores de agua a alta presión y posibles emisiones de compuestos orgánicos solubles que volatizan a temperatura elevada. Para constatar esto, Scapini et al., (2021) observaron que, aunque el uso de agua caliente reduce la necesidad de reactivos químicos, el escape de vapor en etapas de alivio de presión puede contribuir a emisiones atmosféricas importantes sin un adecuado sistema de contención. De igual forma, Gielen et al., (2022) muestran que la composición del gas liberado en procesos hidrotermales puede variar según condiciones operativas y que un control deficiente en plantas piloto puede aumentar la emisión de compuestos volátiles y partículas, por lo que es necesario implementar medidas de captura y ventilación.
Emisiones atmosféricas	-3	4	-12	Las emisiones atmosféricas derivadas del tratamiento hidrotermal son significativas cuando la energía térmica necesaria se obtiene de fuentes fósiles, porque la elevada demanda de calor se traduce directamente en toneladas de CO ₂ equivalentes. En el estudio de Nie y Bi (2018) muestran en un Análisis de ciclo de vida que las etapas de conversión hidrotermal dominan la huella de gases de efecto invernadero del sistema y que la intensidad energética del proceso es un factor clave que determina las emisiones totales. Además, Acaru et al., (2022) resaltan que, sin integración de recuperación de calor o fuentes bajas en carbono, la operación a alta temperatura y presión puede aumentar substancialmente las emisiones indirectas de CO ₂ , por lo que la elección de la matriz energética y la eficiencia en la recuperación térmica son determinantes para reducir la huella de carbono.
Beneficio productivo	+7	5	+35	El tratamiento hidrotermal ofrece un beneficio alto al aumentar la accesibilidad de la celulosa mediante la solubilización selectiva de hemicelulosa y la reestructuración de la matriz lignocelulósica, lo que eleva notablemente los rendimientos enzimáticos y fermentativos. Concretamente, Mahmoodi et al., (2018) reportaron incrementos significativos en la recuperación de azúcares fermentables y en rendimientos de etanol para fracciones de residuos sólidos municipales tras pretratamiento hidrotermal. Asimismo, Martín et al., (2022) resumen múltiples estudios donde la hidrólisis líquida caliente mejora la sacarificación y reduce la recalcitrancia, traduciendo esas mejoras en mayores rendimientos de glucosa y mejores procesos.

Nota. Autores (2025).

Explosión de vapor

El pretratamiento por exposición de vapor consiste en someter la biomasa a vapor saturado a alta temperatura (160 – 240°C) y presión, seguido de una despresurización rápida que provoca la

ruptura mecánica de la estructura lignocelulósica. Durante esta liberación súbita de presión, las fibras se fragmentan, la hemicelulosa se solubiliza parcialmente y la lignina se redistribuye, aumentando de forma significativa la accesibilidad de la celulosa por etapas posteriores.

Tabla 16 Evaluación de impactos ambientales del pretratamiento por explosión de vapor mediante la Matriz de Leopold.

Criterio	M	I	M x I	Descripción
Uso del agua	-5	4	-20	Utiliza un volumen de agua alto, dado que la biomasa debe saturarse mediante vapor o agua líquida antes de la descompresión, lo que implica un alto uso hídrico para asegurar la difusión y el calentamiento uniforme. Por ende, Sui y Chen (2016) evidenciaron que los estados del agua influyen la eficiencia del proceso y requieren grandes cantidades de agua para lograr la saturación adecuada. De igual forma, Ziegler et al., (2021) señalan que, en la explosión de vapor, el agua en estado líquido y el vapor funcionan como medio de transferencia de calor y provocan la expansión dentro de la biomasa, lo que eleva el consumo de agua en comparación con otros pretratamientos.
Consumo de energía	-7	5	-35	Vapor conlleva un consumo de energía muy alto, debido a las etapas de generación de vapor a alta presión, calentamiento de biomasa y rápida descompresión, lo que exige calderas y sistemas de vapor robustos. Por ejemplo, Ziegler et al., (2021) afirman que, aunque la explosión de vapor es relativamente sustentable, el uso de vapor saturado a presión representa una de las principales cargas energéticas del proceso. De igual modo, Jacquet et al., (2015) indican que la necesidad de alcanzar condiciones térmicas y de presión elevadas limita la eficiencia energética del proceso y lo hace inferior en esta dimensión frente a otros pretratamientos.
Generación de residuos	-4	3	-12	Genera residuos considerables, principalmente condensados líquidos y fracciones solubles ricas en compuestos degradados de la hemicelulosa, lo que implica un manejo ambiental más complejo. Por un lado, Jacquet et al., (2015) reportan que los condensados liberados tras la descompresión contiene furfural, HMF y ácidos orgánicos que requieren tratamientos específicos para evitar su carácter inhibitorio y su impacto ambiental. Además, Ziegler et al., (2021) destacan que la formación de compuestos volátiles y solubles durante el proceso genera efluentes que deben ser gestionados cuidadosamente para prevenir efectos negativos en suelos y cuerpos hídricos.
Impacto en el suelo	-2	2	-4	El impacto en el suelo es bajo, siempre que los condensados y efluentes se traten y dispongan adecuadamente. No obstante, Yang et al., (2022) muestran que el material tratado por explosión puede presentar toxicidad como fenoles, flavonoides u otros compuestos que limita su uso directo como sustrato o enmienda si no se remedia. Además, Chen et al., (2019) documentan cambios en parámetros físico-químicos tras el pretratamiento y recomiendan tratamientos adicionales antes de la disposición o aplicación en suelos para evitar incrementos en la carga orgánica o efectos adversos sobre la germinación y el microbiota.

Impacto en el aire	-3	3	9	Genera un impacto moderado en la calidad del aire, porque la despresurización puede dispersar vapores y aerosoles que contienen compuestos formados por la degradación térmica de azúcares y ácidos orgánicos. Por ejemplo, Xia et al., (2020) muestran que la severidad del tratamiento controla fuertemente la producción de furfural y HMF en los condensados, lo que implica riesgo de liberación de fracción volátiles si no hay captura y condensación eficaces. Además, M. Zhao et al., (2023) señalan que sin sistemas de condensación y control de emisiones adecuados la descompresión puede liberar aerosoles y vapores que requieren ventilación, condensadores y tratamiento para evitar su dispersión al ambiente.
Emisiones atmosféricas	-4	4	-16	Implica una huella de emisiones de CO ₂ equivalente significativa, debido al elevado consumo de vapor a presión y electricidad para generar las condiciones de operación. Por consiguiente, Prasad et al., (2016) revelan que las emisiones de CO ₂ del método superan las de otros tratamientos y que la electricidad empleada puede contribuir hasta el 88-99% de dichas emisiones. De igual forma, Kral et al., (2020) confirman mediante un Análisis de Ciclo de Vida aplicado a biogás que la generación de vapor y la electricidad dominan la huella de carbono del sistema cuando no hay integración de recuperación de calor o fuentes bajas en carbono.
Beneficio productivo	+8	5	+40	Ofrece un beneficio productivo muy alto, ya que rompe de manera eficiente la estructura lignocelulósica y aumenta notablemente la accesibilidad de la celulosa para la hidrólisis enzimática. Por ejemplo; Jacquet et al., (2015) describen que la descompresión súbita facilita la liberación de hemicelulosa y la apertura de la fibra, lo que mejora significativamente la sacarificación. También, Ziegler et al., (2021) evidencian que este pretratamiento muestra aumentos notables en rendimientos de azúcares fermentables y en la accesibilidad de la celulosa, lo que se traduce en ventajas productivas.

Nota. Autores (2025).

Tabla 17. Matriz de Leopold adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.

Criterios		Uso de agua	Consumo de energía	Generación de residuos	Impacto en el suelo	Impacto en el aire	Emisiones atmosféricas	Beneficio productivo	Total (Mx D)	Normalizado (1-5)
Físicos	Molienda mecánica	0	-5	-2	0	-4	-4	+20	-8	4.51
	Extrusión	-2	-35	-4	0	-4	-9	+35	-19	3.85
	Irradiación con microondas	-2	-24	0	0	-2	-9	+30	-7	4.57
Químicos	Pretratamiento ácido	-20	-12	-30	-20	-9	-4	+40	-55	1.67
	Pretratamiento alcalino	-20	-12	-30	-20	-9	-4	+40	-55	1.67
	Proceso Organosolv	-6	-12	-20	-20	-20	-20	+32	-66	1.00

	Pretratamiento con peróxido de H ₂ O ₂	-6	-6	-2	-2	-4	-4	+24	0	5.00
Fisicoquímicos	Tratamiento hidrotérmico	-20	-24	-9	-4	-6	-12	+35	-40	2.57
	Explosión de vapor	-20	-35	-12	-4	-9	-16	+40	-56	1.61

Nota. Tabla adaptada de Leopold et al., (1971)

Los resultados de la Matriz de Leopold evidencian diferencias claras en el desempeño ambiental y productivo de los pretratamientos evaluados. Los métodos físicos, como la irradiación con microondas y la molienda mecánica, presentan los impactos ambientales más bajos y los mejores puntajes normalizados, destacados por su capacidad productiva y baja generación de residuos. En contraste, los métodos químicos, especialmente los pretratamientos ácido y alcalino, registran valores más negativos debido al uso elevado de agua, generación de residuos y afectaciones ambientales que pueden generar, pese a su alta eficiencia productiva. Los pretratamientos fisicoquímicos, como el hidrotérmico y la explosión de vapor, muestran un comportamiento intermedio: combinan beneficios productivos altos con impactos ambientales marcados derivados del consumo energético y la formación de efluentes.

La aplicación de la técnica Multicriterio de Decisión con sus siglas en inglés (MCDM) permitió comparar de manera sistemática los diferentes pretratamientos propuestos para el aprovechamiento del Jacinto de agua, a partir de criterios ambientales, técnicos y productivos previamente definidos. Esta herramienta facilita la evaluación integral, asignando puntajes que reflejan la favorabilidad relativa de cada alternativa, con el fin de identificar los métodos más viables en términos de sostenibilidad y eficiencia.

- **Físicos:**

Tabla 18 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento de molienda mecánica

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	5	Presenta una viabilidad técnica muy alta, dado que la molienda es la etapa más utilizada para la reducción de tamaño y emplea equipos ampliamente disponibles y fáciles de operar. Por ejemplo Arce y Kratky, (2022), describen que equipos como martillos, cuchillas o molino de bolas poseen una operación sencilla y requieren bajo nivel de especialización. También Mayer et al., (2018) señalan que estos sistemas ofrecen mantenimiento accesible y operación estable, lo que facilita su implementación en entornos locales.

Rentabilidad económica	4	Ofrece una rentabilidad económica alta, ya que los costos de inversión y operación de los equipos de molienda son menores en comparación con procesos térmicos o químicos más complejos. En este sentido, Mankar et al., (2021) destacan que la molienda demanda menos energía y no utiliza reactivos costosos, reduciendo el costo por tonelada procesar. Asimismo, Moiceanu et al., (2019) explican que la reducción de tamaño mejora la eficiencia en etapas posteriores y disminuye el consumo de enzimas o reactivos por unidad de azúcar liberado, optimizando la economía del proceso.
Impacto ambiental	4	Presenta un impacto ambiental moderado, pues no emplea reactivos químicos y los residuos generados son principalmente partículas vegetales. De hecho, Arce y Kratky, (2022) reportan que la molienda no produce efluentes tóxicos y su impacto depende principalmente del consumo eléctrico. Igualmente, Moiceanu et al., (2019) mencionan que las emisiones de polvo pueden controlarse mediante filtros y extracción localizada, y que el impacto disminuye cuando la energía proviene de fuentes limpias.
Intensidad	2	La intensidad operativa es baja, ya que la molienda es una operación simple, con curva de aprendizaje y pocos requerimientos instrumentales. Por ejemplo, Arce y Kratky, (2022) señalan que esa etapa no requiere manejo de solventes ni condiciones de alta presión, lo que disminuye la complejidad técnica y los riesgos operativos. Del mismo modo,

Nota. Autores (2025).

Tabla 19 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento por extrusión

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	3	La viabilidad técnica de la extrusión es moderada, pues, aunque el proceso es eficaz para desestructurar biomasa lignocelulósica, depende de un control preciso de parámetros como humedad, cizalla, temperatura y geometría del tornillo. Por ejemplo, Konan et al., (2022) explican que la extrusión es una técnica flexible y técnicamente robusta, pero su rendimiento depende de ajustes finos del equipo y de la interacción entre las variables operativas. Asimismo, Duque et al., (2017) destacan que la extrusión continua es técnicamente viable en diversas biomásas, pero solo mantiene estabilidad y reproducibilidad cuando se optimizan las condiciones de operación en función del tipo de sustrato.
Rentabilidad económica	2	La rentabilidad económica de la extrusión tiende a ser baja moderada, debido a que los extrusores industriales requieren una inversión inicial elevada y presentan un consumo energético considerable durante la operación. En este sentido, Konan et al., (2022) señalan que los costos asociados al equipo y a su funcionamiento son mayores que los pretratamientos más simples, lo que dificulta su adopción en escalas pequeñas. De igual manera, (Gallego et al., 2023) evidencia que el proceso solo mejora su desempeño económico cuando se optimizan las condiciones operativas y se trabaja en mayores volúmenes, logrando compensaciones posteriores en etapas como la hidrólisis.
Impacto ambiental	4	El impacto ambiental es moderado. De acuerdo con, Duque et al., (2017) revisan que la extrusión mejora la digestibilidad sin necesidad de grandes volúmenes de solventes, reduciendo la carga de tratamiento de aguas. Además, Gu et al., (2018) muestran que al

		optimizar humedad y temperatura se alcanzan buenos rendimientos con menor aporte hídrico, lo que contribuye a un perfil ambiental favorable frente a otros pretratamientos.
Intensidad	2	La intensidad operativa de la extrusión es baja, pues no requiere presiones extremas ni manejo de solventes, aunque si demanda ajustes técnicos. Por ejemplo, Duque et al., (2017) explican que la operación continua del extrusor es estable y segura, pero requiere personal capacitado para optimizar la velocidad del tornillo y la alimentación del material. Asimismo, Konan et al., (2022) destacan que, una vez configurado el equipo, la extrusión presenta baja complejidad operativa y puede mantenerse con instrumentación mínima en comparación con procesos térmicos o químicos.

Nota. Autores (2025).

Tabla 20 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento por irradiación con microondas

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	4	Presenta una viabilidad técnica media, dado que permite desestructuración rápida y eficiente de la biomasa gracias al calentamiento volumétrico característico de este tipo de energía. Por ejemplo, Hoang et al., (2021) señalan que los microondas favorecen la ruptura de enlaces lignocelulósicos al generar un calentamiento interno uniforme, lo que reduce resistencia estructural de la lignina y la hemicelulosa. Asimismo, Jablonowski et al., (2022) reportan que esta técnica permite controlar de manera precisa parámetros como potencia, humedad y tiempo de exposición, lo que la convierte en una alternativa técnicamente viable para plantas piloto.
Rentabilidad económica	3	La rentabilidad económica es moderada, ya que la inversión en equipos especializado es significativa, aunque los menores tiempos de operación pueden compensar parte de los costos operativos. Por lo que, Hoang et al., (2021) evidencian que la rapidez del calentamiento reduce significativamente los requerimientos energéticos globales, lo que disminuye costos operativos frente a otros métodos energéticos. Por otro lado, Venegas et al., (2025) muestran que los procesos asistidos por microondas reducen el desgaste mecánico y la necesidad de mantenimientos frecuentes, contribuyendo a un mejor equilibrio entre costo beneficio.
Impacto ambiental	4	El impacto ambiental es bueno, ya que evita el uso de reactivos agresivos y opera con tiempos reducidos, lo que disminuye la generación de residuos líquidos. A partir de esto, Hoang et al., (2021) revisan que el calentamiento volumétrico por microondas disminuye la formación de productos de degradación indeseados y reduce la demanda hídrica del proceso. Además, Jablonowski et al., (2022) muestran que, cuando se combina con fuentes de energía renovable o se optimizan parámetros de potencia y tiempo, la irradiación con microondas puede presentar una huella ambiental significadamente menor.
Intensidad	3	La intensidad operativa es moderada, ya que requiere ajustar parámetros como potencia, tiempo de exposición y carga de biomasa para asegurar un calentamiento uniforme. Según, Dawid y Grzegorz (2021) el control preciso de la potencia y la temperatura influye directamente en la eficiencia de ruptura estructural y en la estabilidad térmica del proceso. Por otro lado, Mikulski y Kłosowsk (2023) destacan que, aunque la operación no requiere presión elevada ni

		solventes químicos, si demanda calibración periódica del sistema y monitoreo continua, lo que sitúa su complejidad operativa.
--	--	---

Nota. Autores (2025).

- **Químicos:**

Tabla 21 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento ácido

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	3	La viabilidad del pretratamiento es moderada, puesto que exige una cuidadosa optimización de parámetros como el tiempo de reacción, la temperatura y la concentración del ácido para lograr la eficiencia en la liberación de azúcares fermentables. Por ejemplo, Świątek et al., (2020) evidencian que bajo condiciones controladas de temperatura entre 180 - 220 °C y ácido diluido se logra una significativa liberación de pentosas y hexosas, aunque la formación de inhibidores requiere control operacional riguroso. Además, Woźniak et al., (2025) sostienen que, si bien la hidrólisis ácida es técnicamente viable para diversas biomásas lignocelulósicas, su implementación industrial depende de la adaptabilidad del reactor y del control preciso de severidad, lo que lo convierte en un desafío técnico.
Rentabilidad económica	2	La rentabilidad es baja, debido a que los costos del ácido, la neutralización y la gestión de inhibidores pueden incrementar los gastos operativos y reducir la eficiencia del proceso. En este sentido, L. Zhao et al., (2015) demostraron que este pretratamiento constituye una fracción considerable del costo total en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, siendo determinante la eficiencia de conversión y la escala de operación. Por otra parte, Sharma et al., (2022) evidenciaron que, aunque el proceso puede mejorar el rendimiento en azúcares fermentables, su viabilidad financiera depende de una estricta optimización del consumo energético y de reactivos, lo limita su competitividad frente a alternativas menos intensivistas.
Impacto ambiental	2	El impacto ambiental es negativo, debido a que la formación de subproductos tóxicos como furfural y 5-hidroximetilfurfural (HMF), así como la necesidad de manejar efluentes ácidos, incrementan la carga ambiental del proceso. Por una parte, Prasad et al., (2016) indican que, dentro del análisis de ciclo de vida del pretratamiento ácido, las mayores emisiones de CO ₂ provienen del consumo energético y del tratamiento de los residuos líquidos. De igual manera, Ujor y Okonkwo (2022) revisaron estrategias de detoxificación microbiana y muestran que la biotratación puede reducir eficazmente el furfural y HMF en hidrolizados, aunque estos pasos añaden consumo energético y etapas de gestión que afectan el balance ambiental.
Intensidad	3	Exige una intensidad operativa media porque, más allá de optimizar condiciones, demanda infraestructura y prácticas de operación específicas, como reactores y tuberías construidos con materiales resistentes a la corrosión, sistemas seguros de dosificación y neutralización, y mantenimiento periódico. En particular, Mankar et al., (2021) confirman que la operación continua de procesos químicos exige protocolos de control y mantenimiento que elevan la complejidad operativa. Adicionalmente, Oriez et al., (2019) describen que la manipulación y purificación de los hidrolizados

		ácidos requieren etapas complementarias que aumentan la carga operativa y las demandas de instrumentación y seguridad.
--	--	--

Nota. Autores (2025).

Tabla 22 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento alcalino

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	3	Se caracteriza por su eficacia en la disolución parcial de la lignina y la ruptura de enlaces éster, lo que incrementa la accesibilidad de la celulosa para procesos de hidrólisis enzimática. Por un lado, Kim et al., (2016) señalan que el uso del álcalis como NaOH o Ca(OH) ₂ facilita la saponificación y solubilización de lignina, reduciendo la cristalinidad de la biomasa y mejorando su digestibilidad. Por otro lado, Hamid et al., (2023) demuestran que la aplicación de condiciones alcalinas suaves, combinadas con un control adecuado de temperatura y tiempo, puede lograr eficiencias de delignificación superiores al 70% con mínimos daños a la fracción celulósica.
Rentabilidad económica	3	Se considera moderada, puesto que, aunque ofrece mejoras importantes, los costes de los reactivos, del lavado y de la neutralización pueden reducir su competitividad. Por ejemplo, Yuan et al., (2022) muestran que, incluso en procesos optimizados con recuperación de lignina como coproducto, el precio mínimo del combustible se ve afectado significativamente por el coste del tratamiento. Además, Johannes y Xuan, (2024) indican que, aunque el pretratamiento alcalino elimina lignina de forma más eficiente que el ácido, el mayor coste y complejidad en el manejo de corrientes y reactivos hacen que sea más exigente económicamente.
Impacto ambiental	3	Aunque el pretratamiento alcalino genera grandes volúmenes de aguas residuales y compuestos recalcitrantes, su manejo ambiental sigue siendo un desafío. De acuerdo con Ghosh et al., (2025) estos efluentes contienen sustancias difíciles de degradar que requieren tratamientos avanzados como oxidación o sistema de membranas para evitar afectaciones en cuerpos hídricos. Asimismo, S. Kim et al., (2020) evidenciaron que una parte de estas corrientes puede ser tratada y parcialmente recuperada mediante ultrafiltración; no obstante, la implementación de estas operaciones implica etapas adicionales de manejo y reciclaje de álcalis, lo que incrementa la complejidad del proceso.
Intensidad	4	La intensidad operativa del pretratamiento evidencia en la necesidad de controlar rigurosamente las condiciones de proceso para asegurar su efectividad. Según, García Negrón et al., (2024) reportaron que el uso de soluciones concentradas de NaOH demanda ajustes precisos de temperatura y tiempo para lograr una adecuada modificación estructural de la biomasa, lo que incrementa la exigencia técnica durante la operación. De manera complementaria, Madyira y Olatunj (2025) destacan que la variabilidad en la respuesta del material lignocelulósico obliga a realizar ajustes continuos durante la operación, lo que incrementa la demanda técnica y el nivel de supervisión requerido para garantizar un tratamiento uniforme.

Nota. Autores (2025).

Tabla 23 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento ordanosolv

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
-----------------	----------------------	--------------------

Viabilidad técnica	4	La viabilidad del pretratamiento es alta. De acuerdo con, Islam et al., (2024) la aplicación de una mezcla fórmico-acetona bajo condiciones controladas redujo el contenido de lignina en hasta un 3.85 % en paja de arroz, lo que demuestra una extracción significativa y estable del componente ligninico. Por su parte. W. Li et al., (2023) reportaron remociones de lignina superiores al 98% en bagazo de caña y porcentajes de delignificación del 90% en otros materiales herbáceos al optimizar temperatura, tiempo, carga acida y composición del solvente.
Rentabilidad económica	2	La rentabilidad del pretratamiento está fuertemente influenciada por una inversión inicial sustancial y elevados costos de operación, especialmente ligados al consumo y recuperación de solventes. Por ejemplo, según Tofani et al., (2024) los costos energéticos para destilar y reciclar los solventes orgánicos representan una porción importante de los gastos totales, lo que penaliza la viabilidad económica si no se optimiza la eficiencia del reciclado. Además, el análisis tecno-económico realizado por Rodrigues et al., (2018) muestra que, aunque el proceso puede generar etanol con un precio mínimo competitivo, su rentabilidad depende en gran medida de mejorar la recuperación de solventes para disminuir el precio de venta del etanol.
Impacto ambiental	3	El impacto ambiental del proceso es considerado moderado, dado que su sostenibilidad depende en gran medida de la eficiencia en la recuperación de solventes y del consumo energético. Por un lado, Nair et al., (2023) señalan que, cuando el proceso integra estrategias robustas de reciclaje de solventes y fuentes energéticas de baja emisiones, es posible educir de forma significativa la carga ambiental. Por otra parte, el análisis de Khaowdang et al., (2025) evidencia que el impacto ambiental está fuertemente influenciado por la elección del catalizador y el rendimiento del solvente, ya que configuraciones con menor eficiencia energética o mayores pérdidas de solvente incrementan considerablemente los impactos ambientales.
Intensidad	3	La intensidad operativa es moderada, debido a que la operación requiere controles estrictos y una elevada demanda energética, particularmente durante las etapas de recuperación de solventes. De acuerdo con Nair et al., (2023), la destilación necesaria para reciclar solventes constituye uno de los principales desafíos operativos, ya que exige temperaturas y presiones elevadas que incrementan de forma notable el consumo energético. Asimismo, Tofani et al., (2024) señalan que la escalabilidad industrial se ve limitada por la intensidad energética asociada a la separación y purificación, indicando que tecnologías emergentes como microondas o ultrasonido pueden disminuir la carga operativa, pero requiriendo de inversiones adiciones y ajustes técnicos específicos.

Nota. Autores (2025).

Tabla 24 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento peróxido de hidrogeno

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	4	La viabilidad técnica del pretratamiento para biomasas es alta, pues este método ha mostrado capacidad real de remover lignina y mejorar la accesibilidad de la celulosa bajo condiciones adecuadas. De acuerdo con G. Zhang et al., (2024) el uso de H ₂ O ₂ ajustado en concentración y temperatura promueve eficazmente la

		despolimerización de la lignina y reduce la energía de activación necesaria para la hidrólisis en biomasa lignocelulosa. Por otra parte, Ummalya et al., (2024) demuestran que este agente oxidante, aplicando de forma moderada, permite lograr remociones significativas de lignina en residuos tipo bambú, lo cual favorece la sacarificación enzimática al exponer la celulosa sin degradarla excesivamente.
Rentabilidad económica	3	La rentabilidad económica del pretratamiento con peróxido de hidrógeno se considera moderada, debido a los costos asociados al consumo del reactivo, la necesidad de catalizadores y los sistemas requeridos para su manejo seguro y posterior neutralización. Por un lado, Yuan et al., (2019) demostraron que la optimización de un proceso Cu-AHP mediante el aumento controlado de temperatura permitió reducir tanto la carga química como el tiempo de operación, disminuyendo el precio mínimo al que debe venderse el biocombustible para cubrir los costos del proceso. Además, Ho et al., (2019) señalan que, aunque el pretratamiento puede mejorar notablemente la eficiencia de sacarificación, su escalabilidad industrial sigue limitada por el precio del peróxido, los requerimientos del pH alcalino y la necesidad de etapas adicionales de recuperación, factores que incrementan los costos operativos si no se logran integrar estrategias de reciclaje de reactivos.
Impacto ambiental	3	Se considera moderado, principalmente porque, aunque evita el uso de ácidos fuertes o solventes muy tóxicos, aun exige una gestión cuidadosa del agente oxidante y de los metales catalíticos. por lo que, Ho et al., (2019) indican que el uso H ₂ O ₂ ofrece ventajas como menor formación de inhibidores y una carga térmica relativamente más baja, lo que contribuye a una huella ambiental menor si el proceso está bien diseñado. Asimismo, Ummalya et al., (2024) señalan que cuando los catalizadores metálicos no se recuperan o cuando el manejo de radicales libres es inadecuado, pueden generarse impactos adicionales por residuos metálico y oxidantes, lo cual compromete la sostenibilidad del pretratamiento.
Intensidad	4	La intensidad operativa es alta, debido al manejo de este oxidante exige control estricto de varios parámetros clave. En este sentido, H. Zhang y Wu (2023) señalan que la eficacia del proceso depende de regular con precisión la concentración de H ₂ O ₂ , la temperatura y el tiempo de reacción para evitar la degradación de la celulosa, lo que incrementa la exigencia técnica y la necesidad de monitoreo continuo. De igual forma, Hu et al., (2023) evidencian que integrar H ₂ O ₂ con radiación UV permite mejorar la deestructuración de la biomasa, pero introduce mayores demandas operativas al requerir equipos especializados para radiación, pH y manejo seguro de oxidantes, elevando así la complejidad del sistema.

Nota. Autores (2025).

- **Fisicoquímicos**

Tabla 25 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento hidrotérmico

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	4	La viabilidad del pretratamiento es alta ya que permite procesar la biomasa solo con agua, en fase líquido o vapor, a temperaturas elevadas entre 150 – 230 °C y presiones moderadas, sin necesidad de reactivos agresivos. En este sentido, Show et al., (2023) demostraron

		que el tratamiento térmico de Jacinto de agua aumenta la degradabilidad y la accesibilidad enzimática, favoreciendo la producción de biogás y mejorando la eficiencia de la hidrólisis. Además, Xu et al., (2023) reportaron que un pretratamiento hidrotérmico corto aplicado a bagazo de caña, una biomasa herbácea análoga, reduce la cristalinidad de la celulosa y despolimeriza la lignina, aumentando significativamente la sacarificación enzimática, lo que indica que el método es efectivo para biomásas de alta humedad y baja lignina.
Rentabilidad económica	3	Se considera moderada, ya que, aunque no requiere reactivos costosos, incurre en un gasto significativo por el consumo energético para alcanzar temperaturas elevadas y mantener la presión del proceso. En particular, según Ceaser et al., (2024) los costos del pretratamiento para bioetanol de biomasa lignocelulósica, representan entre un 11% y el 27% y dentro de estos costos, la energía para calentar el agua figura como uno de los principales contribuyentes. Por otra parte, Abeysuriya et al., (2024) en su estudio simulan diferentes rutas de producción de bioetanol con Jacinto de agua, donde encontraron que los escenarios con pretratamiento hidrotérmico pueden tener un consumo energético elevado, lo que implica la optimización del balance energético y la reutilización del calor, siendo clave para una economía favorable del proceso.
Impacto ambiental	3	Es moderada, ya que, aunque evita el uso de químicos agresivos como ácidos o álcalis, aun demanda energía térmica importante para mantener el agua a alta temperatura. Por un lado, Prasad et al., (2016) señalan que el pretratamiento con “agua caliente” presenta emisiones de CO ₂ significativamente más baja en comparación con otros métodos, lo que hace bastante favorable desde la perspectiva del cambio climático. Por otro lado, Zhu et al., (2025) mencionan que uno de los principales retos ambientales es el alto consumo energético para alcanzar las condiciones de severidad, lo cual podría contrarrestar las ventajas “verdes” del proceso si no se optimiza la eficiencia energética.
Intensidad	4	Es alta, principalmente por los retos técnicos asociados al control de temperatura, presión y severidad del proceso. En particular, B. Yang et al., (2018) indican que alcanzar estas condiciones implica un consumo energético considerable y la necesidad de materiales que soporten operación continua bajo estrés térmico y de presión. Además, Phojaroen et al., (2022) reportan que los procesos combinados hidrotérmico-mecánicos requieren un balance cuidadoso entre energía y diseño de equipos para mantener la eficiencia en la liberación de azúcares, lo que aumenta la complejidad operativa del sistema.

Nota. Autores (2025).

Tabla 26 Evaluación multicriterio de decisión del pretratamiento explosión de vapor

Criterio	Puntaje (1-5)	Descripción
Viabilidad técnica	4	La explosión de vapor es un método termo-mecánico en el que la biomasa se somete a vapor a alta presión y temperatura, seguido de una descomposición súbita que rompe la estructura celular. Por un lado, Jacquet et al., (2015) describen que este mecanismo como una combinación de “vaporcracking” y descompresión que facilita la disgregación de componentes estructurales sin requerir enormes cantidades de químicos. Asimismo, Sarker et al., (2021) destacan que la exposición de vapor es eficaz para despolimerizar hemicelulosa y lignina en una variedad de biomásas, mejorando significativamente la digestibilidad enzimática sin necesidad de reactivos agresivos.
Rentabilidad económica	3	La rentabilidad económica de la explosión de vapor se considera moderada, ya que, aunque requiere invertir en calderas y equipos capaces de manejar altas presiones, no depende de químicos costosos, lo que reduce los costos operativos en comparación con pretratamientos químicos agresivos. Por un lado, A. K. Kumar y Sharma, (2017) en su revisión sobre bioetanol de biomasa lignocelulósica, los costos de pretratamiento representan entre un 11% y el 27% del costo total de producción y dentro de estos costos, la energía para calentar el agua figura como uno de los principales contribuyentes. Por otra parte, Abeysuriya et al., (2024) evaluaron los costos fijos y variables en distintas configuraciones, mostrando que, aunque la inversión inicial es alta, los costos pueden amortizarse en plantas industriales bien dimensionadas.
Impacto ambiental	3	Se considera moderado porque, aunque evita el uso de reactivos corrosivos o tóxico, requiere un consumo energético considerable para la generación de vapor. Según, Ziegler et al., (2021), este método se considera un proceso más limpio al basarse únicamente en altas presiones y temperaturas, reduciendo la necesidad de insumos externos minimizando la generación de efluentes contaminantes. De igual forma, Khoshnevisan et al., (2016) evidencian que la explosión de vapor contribuye a disminuir las emisiones totales asociadas a la conversión de la biomasa, particularmente cuando se integran en cadenas de producción de biocombustibles, debido a su eficiencia energética y a la menor cantidad de químicos.
Intensidad	4	La intensidad operativa es alta, porque el proceso implica mantener vapor a alta presión y temperatura, además de una descompresión muy rápida que requiere equipos técnicos especializados. Por un lado, Ziegler et al., (2021) señalan que, aunque la explosión es eficiente, el control de la velocidad de descompresión es crítico; la tasa de caída de presión influye directamente en la ruptura mecánica de la biomasa, lo cual demanda diseño de equipos preciso y sistemas de seguridad. Además, según Banu J et al., (2021) para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica, la operación de alta presión 10 - 20 bar y temperatura requiere tiempos de retención optimizados y materiales resistentes, lo que añade complejidad al diseño y mantenimiento de las unidades de explosión.

Nota. Autores (2025).

Tabla 27. Matriz de MCDM adaptada a métodos de biotransformación del Jacinto de agua.

Criterio	Ponderación	Físicos			Químicos				Fisicoquímicos	
		Molienda mecánica	Extrusión	Irradiación con microondas	Pretratamiento ácido	Pretratamiento alcalino	Proceso organosolv	Peróxido de hidrógeno	Tratamiento hidrotérmico	Explosión de vapor
Viabilidad técnica (1-5)	30	5	3	4	3	3	4	4	4	4
Rentabilidad económica (1-5)	25	4	2	3	2	3	2	3	3	3
Impacto ambiental (1-5)	25	4	4	4	2	3	3	3	3	3
Intensidad (1-5)	20	1	2	3	3	4	3	3	4	4
Impacto ponderado	100	3.7	2.8	2.8	2.5	3.2	3.05	3.3	3.5	3.5

Nota. Adaptado de *Bravo et al., (2021)*.

A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la Matriz de Leopold, utilizada para identificar y valorar los impactos ambientales asociados a cada pretratamiento y la Matriz de Evaluación Multicriterio (MCDM), que permitió analizar los aspectos técnicos, económicos y ambientales de cada alternativa, se construyó la Matriz DOFA. Esta integración metodológica permitió combinar resultados cuantitativos y cualitativos, proporcionando una visión más completa del desempeño de cada proceso y su aplicabilidad en contextos agroindustriales sostenibles. Esta síntesis permitió identificar las principales fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de los pretratamientos evaluados, lo que facilitó la formulación de estrategias de aprovechamiento sostenible del Jacinto de agua.

Tabla 28. Matriz DOFA para los métodos de pretratamiento para el Jacinto de agua en Gamarra, Cesar

Método de pretratamiento	Tipo	Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas

Físicos	Molienda Mecánica	Alta eficiencia en la reducción del tamaño de la partícula, incrementado el área superficial disponible	Aumento del rendimiento en etapas posteriores, como la hidrólisis o la fermentación	Costo energético	Desgaste del equipo y costos de mantenimiento
	Extrusión	Combinación de calor, presión y cizalla que favorece la ruptura estructural de la biomasa	Posibilidad de aplicar a escala piloto con bajo uso de químicos	Requiere control preciso de temperatura y humedad	Costos iniciales elevados por el equipo
	Irradiación con Microondas	Acelera la ruptura de enlaces lignocelulósicos en cortos periodos de tiempo	Compatible con procesos verdes y bajo consumo de reactivos	Poca homogeneidad en muestras de gran volumen	Limitaciones para escalamiento industrial
Químicos	Pretratamiento ácido	Alta eficiencia en la hidrólisis de las hemicelulosas	Mejora la accesibilidad de la celulosa para enzimas o microorganismos	Formación de compuestos inhibidores como furfural y HMF	Riesgos ambientales y de corrosión por uso de ácidos fuertes
	Pretratamiento alcalino	Disminuye el contenido de lignina, facilitando la digestión enzimática	Potencia el uso de residuos agrícolas	Genera afluentes con alta carga de sales	Costos de neutralización y manejo de residuos
	Proceso organosolv	Recuperación de lignina de alta pureza y fraccionamiento selectivo	Producción de subproductos con valor agregado como biopolímeros o resinas	Uso de solventes costosos y necesidad de recuperación	Normatividad estricta por el uso de solventes
	Pretratamiento con peróxido de hidrógeno	Oxidación selectiva de lignina sin generar compuestos tóxicos	Proceso ambiental más limpio que los otros pretratamientos químicos.	Requiere control estricto de pH y temperatura	Elevado costo del reactivo a gran escala
Fisicoquímicos	Tratamiento hidrotérmico	Disolución parcial de hemicelulosa y lignina sin el uso de químicos	Favorece procesos sostenibles con menor carga contaminante	Necesidad de equipos que resistan altas presiones	Alto costo inicial para su implementación

	Explosión de vapor	Disrupción efectiva de la membrana lignocelulósica	Permite mejorar la conversión de la biomasa en azúcares fermentables	Genera subproductos inhibidores si no se controla bien el tiempo	Riesgos de operación por altas presiones
--	---------------------------	--	--	--	--

Nota. Fuente Autores.

A partir de los resultados obtenidos en la matriz DOFA, se permitió identificar los principales factores internos y externos que incluyen en la selección y aplicación de los pretratamientos evaluados para el aprovechamiento del Jacinto de agua en el municipio de Gamarra, Cesar. En el primer grupo los pretratamientos físicos, la molienda mecánica se destacó por su fortaleza en la reducción eficiente del tamaño de la partícula y el aumento de la superficie específica de la biomasa, lo que mejora la accesibilidad en procesos posteriores. No obstante, su debilidad principal radica en el consumo de energía y el desgaste del equipo. Por otro lado, la extrusión presenta ciertas ventajas operativas al combinar la fuerza mecánicas y el calor, lo que favorece la ruptura estructural de la lignina, aunque su implementación requiere maquinaria especializada. En cuando a la irradiación con microondas, sobresale su capacidad para acelerar la disrupción de la matriz lignocelulósica, reduciendo tiempos de reacción; sin embargo, su limitación es el elevado costo energético y de equipos.

Con respecto a los pretratamientos químicos, el proceso ácido muestra gran efectividad para solubilizar hemicelulosas, aunque con el riesgo de generar compuestos inhibidores como el furfural, lo que afecta directamente al proceso de fermentación. El pretratamiento alcalino, en contraste, favorece la remoción de lignina y mejora la digestibilidad enzimática, pero presenta mayor consumo de agua y reactivos químicos. El proceso organosolv demostró ser una alternativa de alta selectividad en la separación de lignina y celulosa, generando una biomasa más pura y aprovechable; su debilidad es el uso de solventes orgánicos y los requerimientos de recuperación. Por otro lado, el pretratamiento con peróxido de hidrogeno se considera una opción ambientalmente más limpia, gracias a la reducción de residuos tóxicos, aunque requiere de control estricto en las condiciones de operaciones para evitar la degradación de la celulosa.

En los métodos fisicoquímicos, el tratamiento hidrotérmico se destacó por su bajo impacto ambiental y la ausencia de químicos añadidos, aunque si rendimiento depende del control preciso de la temperatura y la presión. Asimismo, la explosión de vapor, por su parte, ofrece una elevada eficiencia en la digestión estructural de la biomasa lignocelulósica, reduciendo los tiempos del

proceso, pero puede generar pérdidas parciales de azúcares y compuestos volátiles. De forma general, el análisis reveló que los pretratamientos presentan mayor potencial, mientras que los químicos ofrecen mejor eficiencia en la separación, pero con desafíos ambientales asociados a la generación de efluentes. En cuanto a los físicos, aunque más simples y accesibles, requieren optimización energética para ser competitivos. Esta evaluación integral constituye una base sólida para seleccionar estrategias de aprovechamiento del Jacinto de agua orientadas a la sostenibilidad y la viabilidad agroindustrial.

6.1.3. Objetivo específico 3: Proponer estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la producción de bioetanol, de acuerdo con los pretratamientos más destacados en la literatura y en el contexto del municipio de Gamarra, Cesar.

Con el fin de garantizar un análisis integral y equitativo de los diferentes enfoques tecnológicos, se seleccionó un pretratamiento representativo por cada tipo físico, químico y fisicoquímico, priorizando aquellos que obtuvieron mayores puntajes y mejores valoraciones en las matrices de Leopold y Evaluación Multicriterio (MCDM). Esta selección equilibrada permitió considerar no solo la eficiencia técnica y ambiental de cada pretratamiento, sino también su aplicabilidad dentro de las condiciones agroindustriales del municipio de Gamarra, fortaleciendo así la pertinencia del análisis y la comparación entre los distintos métodos. Esta metodología de selección equitativa no solo garantizó la comparación objetiva entre alternativas, sino que también permitió definir estrategias de aprovechamiento diversificadas que respondan a los distintos niveles de infraestructura, capacidad técnica y disponibilidad de recursos existentes en el municipio.

A partir de los resultados obtenidos en las matrices de Leopold y MCDM, se determinaron tres alternativas con mayor viabilidad global: la molienda mecánica, el tratamiento hidrotérmico y el pretratamiento con peróxido de hidrógeno. Cada uno fue analizado individualmente de acuerdo con su desempeño técnico, económico, ambiental y su adaptación al contexto local. Además, se empleó la matriz DOFA como herramienta complementaria para identificar los factores internos y externos que influyen en la implementación de estos pretratamientos.

a. Molienda mecánica (Pretratamiento Físico)

La molienda mecánica obtuvo el mayor puntaje en la matriz MCDM con un valor de 3.7 y un desempeño ambiental positivo en la matriz de Leopold de 4.51, lo que evidencia su alta eficiencia en la reducción del tamaño de partícula y el aumento del área superficial disponible para hidrólisis

posterior. Según Krátký, (2022) y Pérez et al., (2022), este pretratamiento mejora la accesibilidad de la biomasa lignocelulósica al reducir su resistencia estructural y facilitar la acción de enzimas y microorganismos durante la fermentación.

En el municipio de Gamarra, su principal fortaleza radica en la simplicidad operativa y en la posibilidad de implementarse con equipos de bajo costo, como molinos de cuchillos o martillos. Además, estos equipos presentan bajo mantenimiento y alta durabilidad, lo que favorece su adopción en asociaciones productivas o cooperativas locales con recursos limitados. Sin embargo, su principal debilidad identificada en la matriz DOFA corresponde al consumo energético. Por ello, se propone su optimización mediante el uso de energía solar fotovoltaica para alimentar los equipos de molienda, reduciendo costos operativos y emisiones asociadas. Esta alternativa se ajusta a la disponibilidad de recursos renovables en la región y fortalece su enfoque sostenible.

b. Tratamiento Hidrotérmico (Pretratamiento Físicoquímico)

El tratamiento hidrotérmico registro un puntaje medio alto en la matriz MCDM de 3.5 y una valoración ambiental moderada en la matriz de Leopold de 2.57 debido al consumo energético requerido para mantener condiciones de alta temperatura y presión. No obstante, Galbe y Wallberg, (2019); Martín et al., (2022) destacan su relevancia como un proceso ambientalmente limpio, ya que utiliza únicamente agua para modificar la estructura lignocelulósica, solubilizar parcialmente la hemicelulosa y reducir la lignina sin generar afluentes tóxicos.

En Gamarra, este pretratamiento representa una opción viable en escenarios con infraestructura intermedia, como calderas o reactores a presión moderada con temperaturas que oscilan entre 160 – 180 °C, y puede optimizarse mediante sistemas de recirculación de agua y aprovechamiento del vapor residual. Por ejemplo, en la recuperación de vapor y acondicionamiento de la biomasa previa a la hidrólisis, con el fin de mejorar la eficiencia energética. Este aprovechamiento del vapor residual contribuye a cerrar los ciclos de energía y agua dentro del proceso, alineándose a los principios de bioeconomía circular y reduciendo significativamente la huella hídrica del sistema productivo. Su aplicación permitirá reducir el uso de reactivos químicos y promover un aprovechamiento sostenible del recurso hídrico, en concordancia con los principios de sostenibilidad establecidos por la ONU en el 2015.

c. Pretratamiento con Peróxido de Hidrógeno H₂O₂ (Pretratamiento Químico)

El pretratamiento con peróxido de hidrogeno alcanzo la máxima puntuación ambiental en la matriz de Leopold 5.0 y un puntaje de 3.3 en la MCDM, destacándose por su capacidad de delignificación selectiva y su bajo impacto ambiental. Yan et al., (2015) y Meng et al., (2022) demostraron que este método mejora significativamente la digestibilidad enzimática del Jacinto de agua y otras biomásas lignocelulósicas, sin generar subproductos tóxicos ni residuos peligrosos.

En el análisis DOFA, su principal fortaleza es la eficiencia en la remoción de lignina, mientras que su debilidad se asocia al costo del reactivo y la necesidad de mantener controles en cuanto al pH y temperatura. Por ello, se propone su optimización mediante concentraciones reducidas entre 1 – 5 % de H₂O₂, controlando el pH entre 10 – 11 y la temperatura entre 40 – 60 °C, tal como lo sugieren Zhang et al., (2022). Este ajuste técnico permitirá su implementación en pequeña escala, reduciendo el consumo químico y garantizando una operación segura, viable para laboratorios o plantas piloto. Su aplicación a pequeña escala también lo convierte en un modelo transferible para proyectos de investigación aplicada o plantas demostrativas en la región, fortaleciendo la innovación local en biotecnología ambiental.

El análisis de los tres pretratamientos evidencia que cada uno constituye una alternativa independiente y complementaria para el aprovechamiento sostenible del Jacinto de agua en Gamarra, Cesar. La molienda mecánica se adapta a entornos con infraestructura básica y energía renovable; el tratamiento hidrotérmico, se ajusta a sistemas intermedios con control térmico, y el pretratamiento con H₂O₂, a instalaciones más tecnificadas con acceso a reactivos. En conjunto estas estrategias conforman tres rutas de optimización adaptables a distintos niveles de desarrollo agroindustrial, promoviendo una bioeconomía local basada en recursos sostenibles y tecnologías apropiadas. Además, se articulan con los Objetivos de Desarrollo sostenible, impulsando la transición hacia sistemas productivos de bajo impacto ambiental, fortaleciendo la economía circular y la sostenibilidad energética del municipio de Gamarra, Cesar.

6.2. Discusión de resultados

El análisis integral de los resultados obtenidos en la investigación permitió correlacionar los hallazgos derivados de los tres objetivos específicos, estableciendo una visión global sobre la viabilidad técnica, ambiental y socioeconómica del aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como biomasa agroindustrial en el municipio de Gamarra, Cesar. En primer lugar, con respecto al objetivo específico 1, los resultados de la caracterización fisicoquímica de la biomasa evidenciaron un alto contenido de humedad y materia orgánica, características que coinciden con los valores reportados por Gajendra et al., (2020), quien describe al Jacinto de agua como una de las biomásas acuáticas con mayor potencial energético debido a su rápida tasa de crecimiento y composición rica en celulosa y hemicelulosa.

Este comportamiento reafirma lo planteado por Carreño y Rodríguez, (2019), quienes destacan que la planta constituye un recurso estratégico para procesos de bioenergía y fitorremediación, siempre que se implementen las tecnologías adecuadas de pretratamiento y manejo ambiental. Además, los resultados locales demostraron que la abundancia del Jacinto en ecosistemas tropicales representa una oportunidad real para la producción de bioetanol y biogás, reduciendo simultáneamente los impactos ecológicos asociados a su proliferación.

En relación con el objetivo específico 2, orientado a evaluar los impactos ambientales, técnicos y económicos de los diferentes pretratamientos aplicables al Jacinto de agua mediante las matrices de Leopold, Evaluación Multicriterio (MCDM) y DOFA, los resultados obtenidos evidenciaron una clara diferenciación entre los métodos analizados, permitiendo priorizar aquellos con mayor potencial de implementación en el contexto del municipio de Gamarra, Cesar. La matriz de Leopold permitió valorar los efectos ambientales de cada pretratamiento considerando variables como el consumo de agua, energía, generación de residuos, emisiones y uso de reactivos. En este análisis, el pretratamiento con peróxido de hidrogeno (H_2O_2) obtuvo la máxima puntuación ambiental de 5.0, lo cual concuerda con lo señalado por J. Yan et al., (2015) y Meng et al., (2022), quienes destacan que este método produce una deslignificación eficiente sin generar subproductos tóxicos ni efluentes peligrosos.

Por su parte, la molienda mecánica presentó un comportamiento ambiental igualmente favorable de 4.51, sustentado en su bajo requerimiento de insumos y ausencia de contaminantes, tal como lo describe Krátký, (2022). Asimismo, el tratamiento hidrotérmico obtuvo una valoración

ambiental moderada de 2.57, asociada al elevado consumo energético requerido para mantener condiciones térmicas entre 160 y 180 °C, lo que coincide con los hallazgos de Galbe y Wallberg, (2019), quienes señalan que este tipo de procesos, aunque ambientalmente limpios, presentan una huella energética significativa si no se integran estrategias de recuperación de calor.

En cuanto la matriz MCDM, que ponderó criterios técnicos, económicos y ambientales, los resultados evidenciaron que la molienda mecánica obtuvo el mayor puntaje de 3.7, seguida del tratamiento hidrotérmico de 3.5 y el pretratamiento con H₂O₂ de 3.3. este comportamiento refuerza lo expuesto por Mankar et al., (2021), quien plantea que los pretratamientos físicos son más viables en entornos con recursos limitados debido a su bajo costo y facilidad de implementación. En cambio, los métodos químicos, aunque más eficientes en la remoción de lignina, implican mayores costos operativos y requerimientos técnicos, aspectos especialmente relevantes en territorios rurales como Gamarra.

En complemento a los resultados anteriores, la matriz DOFA permitió contextualizar la viabilidad de los pretratamientos en función de los factores internos y externos del entorno local. Dentro de las fortalezas, se destacó la alta eficiencia técnica de los métodos como la molienda mecánica y el pretratamiento con peróxido de hidrogeno, los cuales favorecen la reducción del tamaño de la partícula y la oxidación selectiva de la lignina sin generar compuestos tóxicos. Asimismo, el tratamiento hidrotérmico fue reconocido por su carácter ambientalmente limpio, al no requerir el uso de químicos agresivos. Las oportunidades identificadas se relacionan con el potencial de mejorar el rendimiento en etapas posteriores de hidrolisis y fermentación. Además, de la posibilidad de aplicar procesos sostenibles con menor carga contaminante y la valorización de residuos agrícolas.

Entre las debilidades resaltaron el consumo energético elevado de los procesos mecánicos y térmicos, la necesidad de control preciso de variables como pH y temperatura en los tratamientos químicos y los costos iniciales asociados al uso de reactores y equipos especializados. Finalmente, las amenazas se vinculan con los riesgos de operación por altas presiones, la corrosión de materiales y los costos de mantenimiento de equipos, los cuales podrían limitar su escalabilidad en contextos rurales. No obstante, estos resultados permiten proponer estrategias de optimización tecnológica y energética que, al integrarse con las fortalezas locales del municipio, como

disponibilidad de biomasa y energía solar, fortalecen la viabilidad de implementar un esquema sostenible de aprovechamiento del Jacinto de agua en Gamarra, Cesar.

Finalmente, respecto al objetivo específico 3, orientando a proponer estrategias de optimización para el aprovechamiento del Jacinto de agua en la producción de bioetanol, partió de los resultados del objetivo anterior, seleccionando los tres pretratamientos más viables y formulando rutas de mejora adaptadas al contexto de Gamarra, Cesar. Cada alternativa fue analizada desde una perspectiva técnica, ambiental y de infraestructura local, integrando los resultados de las matrices previas con criterios de sostenibilidad y escalabilidad. En este sentido, los pretratamientos priorizados, como la molienda mecánica, tratamiento hidrotérmico y pretratamiento con peróxido de hidrogeno, representan tres enfoques complementarios con potencial aplicación en distintos niveles de desarrollo agroindustrial.

La molienda mecánica fue identificada como la opción más viable en entornos rurales con baja disponibilidad tecnológica, dado a su bajo costo, facilidad de operación y mínimo impacto ambiental. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Krátký, (2022) y Pérez et al., (2022), quienes afirman que la fracción del tamaño de la partícula aumenta significativamente la accesibilidad de la biomasa para las enzimas hidrolíticas, mejorando el rendimiento de conversión de azúcares fermentables. Su implementación con energía solar fotovoltaica permitirá reducir los costos energéticos y fomentar la autosuficiencia productiva en el municipio.

Por otro lado, el tratamiento hidrotérmico se destaca como una opción intermedia, adecuada para sistemas con infraestructura para romper las estructuras lignocelulósicas sin generar residuos tóxicos. De acuerdo con Galbe y Wallberg (2019); Martín et al., (2022), este tipo de pretratamiento constituye una alternativa ambientalmente limpia y compatible con la bioeconomía circular, especialmente si se integran sistemas de recirculación de agua y recuperación del vapor residual para disminuir el consumo energético. Su adopción en Gamarra favorecería la transición hacia procesos más sostenibles, con un menor uso de químicos y una mejor gestión del recurso hídrico. En cuanto al pretratamiento con peróxido de hidrogeno, su eficiencia en la deslignificación y mejora de la digestibilidad enzimática lo posicionan como un método altamente efectivo, aunque dependiente del control de variables como pH, temperatura y concentración de reactivos.

Estudios como el de Yan et al., (2015); Meng et al., (2022) y Zhang et al., (2018) respaldan su potencial para biomasa lignocelulósicas como el Jacinto de agua, destacando que concentraciones

de H₂O₂ entre 1-5% y temperaturas de 40 – 60 °C logran una eliminación significativa de la lignina sin degradar la celulosa. En este contexto, su implementación en Gamarra sería factible en laboratorios o plantas piloto, sirviendo como modelo de innovación tecnológica para la región. De manera general, el análisis demostró que los tres pretratamientos no deben entenderse como estrategias aisladas, sino también como alternativas complementarias que pueden integrarse de forma progresiva según el nivel de infraestructura y disponibilidad de recursos. La molienda mecánica se adapta a un esquema básico de aprovechamiento; el tratamiento hidrotérmico, a proceso de mediana escala con control térmico, y el peróxido de hidrogeno, a contexto más tecnificados. Esta visión escalonada contribuye a fortalecer la bioeconomía local, impulsado la sostenibilidad energética y ambiental del municipio de Gamarra.

6.3. Conclusiones

El análisis integral del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) evidenció su alto potencial como biomasa agroindustrial para la producción de bioetanol en el municipio de Gamarra, Cesar. Los resultados obtenidos en los tres objetivos específicos permitieron establecer una visión técnica, ambiental y socioeconómica del aprovechamiento sostenible de esta especie articulando la valorización energética con la mitigación de sus impactos ecológicos.

1. En relación con el objetivo específico 1, la caracterización fisicoquímica del Jacinto de agua demostró un contenido significativo de humedad, materia orgánica, celulosa y hemicelulosa, componentes que respaldan su viabilidad como materia prima para la obtención de biocombustibles. Estos resultados coinciden con la literatura científica y confirman que su abundancia en cuerpos de agua tropicales puede aprovecharse como una fuente renovable, reduciendo los impactos ambientales ocasionados por su proliferación no controlada.
2. Respecto al objetivo específico 2, la aplicación de las matrices de Leopold, Evaluación Multicriterio (MCDM) y DOFA permitió identificar los pretratamientos más adecuados para la valorización del Jacinto de agua, considerando sus dimensiones técnicas, económicas y ambientales. El análisis integrado evidenció que la molienda mecánica se destacó por su bajo costo y mínimo impacto ambiental; el tratamiento hidrotérmico, por su limpieza y eficiencia estructural; y el uso de H₂O₂, por su alta capacidad de deslignificación sin generar subproductos tóxicos. Estos resultados validan la pertinencia de combinar herramientas multicriterio para definir tecnologías apropiadas a contextos rurales.
3. Finalmente, el objetivo específico 3, las estrategias de optimización propuestas para cada pretratamiento demostraron que es posible adaptar soluciones tecnológicas a diferentes niveles de infraestructura en Gamarra. La molienda mecánica se posiciona como una alternativa básica sustentable con energía solar fotovoltaica; el tratamiento hidrotérmico, como una opción intermedia de bajo impacto ambiental mediante la recirculación de agua y aprovechamiento del vapor residual; y el pretratamiento con peróxido de hidrogeno, como una ruta tecnificada y escalable en planta piloto o de investigación. En conjunto, estas estrategias fortalecen la transición hacia una bioeconomía circular local basada en el aprovechamiento racional de los recursos.

En conclusión, la biotransformación del Jacinto de agua constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable para el desarrollo agroindustrial sostenible de Gamarra, Cesar. Su implementación permitirá reducir la carga contaminante en los ecosistemas acuáticos, diversificar las fuentes de energía renovable y generar oportunidades productivas locales en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios de economía circular.

6.4. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y del análisis de los objetivos específicos, se establecen las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer la viabilidad técnica, ambiental y socioeconómica del aprovechamiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en el municipio de Gamarra, Cesar. Estas sugerencias buscan consolidar un modelo de gestión sostenible de la biomasa, promoviendo la transición hacia sistemas productivos basados en la bioeconomía y la economía circular. Asimismo, las recomendaciones proponen acciones concretas que favorecen la optimización de los procesos de pretratamiento, el fortalecimiento de capacidades locales y la articulación institucional necesaria para garantizar la sostenibilidad y escalabilidad del proyecto a futuro.

1. Implementación progresiva de los pretratamientos priorizados. Se recomienda adoptar una estrategia gradual de aprovechamiento del Jacinto de agua, iniciando con la molienda mecánica en asociaciones productivas o plantas de pequeña escala, aprovechando su bajo costo inicial, facilidad de operación y la posibilidad de alimentarla mediante sistemas solares fotovoltaicos. En etapas posteriores, se podría incorporar el tratamiento hidrotérmico en instalaciones con infraestructura intermedia y, finalmente, el pretratamiento con peróxido de hidrogeno, en contextos tecnificados o plantas piloto, garantizando una transición escalonada hacia una producción más eficiente y sostenible.
2. Fortalecimiento de capacidades técnicas locales. Es fundamental promover procesos de capacitación y transferencia tecnológica dirigidos a productores, técnicos y emprendedores locales, enfocados en la operación segura y eficiente de los equipos de molienda, control de variables del tratamiento hidrotérmico y manejo del peróxido de

hidrogeno. Estas acciones contribuirán a mejorar la competitividad regional y asegurar la sostenibilidad operativa de los procesos de biotransformación.

3. Evaluación ambiental continua. Se sugiere implementar un sistema de monitoreo ambiental que evalúe los impactos generados durante la recolección, pretratamiento y transformación del Jacinto de agua, garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente y promoviendo la mejora continua del proceso. Este seguimiento también debe incluir indicadores de eficiencia energética, consumo de agua y generación de emisiones.
4. Fomento de alianzas interinstitucionales. Se recomienda establecer vínculos entre instituciones educativas, entidades gubernamentales y asociaciones agroindustriales, con el fin de consolidar proyectos de investigación aplicada orientados a la producción de bioetanol y otros bioproductos derivados del Jacinto de agua, o incluso otras materias primas lignocelulósicas. Estas alianzas permitirán acceder a recursos técnicos y financieros, potenciando la escalabilidad del proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abey Suriya, D. I., Sethunga, G. S. M. D. P., & Rathnayake, M. (2024a). Process simulation-based scenario analysis of scaled-up bioethanol production from water hyacinth. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(15), 17677–17692. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03891-w>
- Abey Suriya, D. I., Sethunga, G. S. M. D. P., & Rathnayake, M. (2024b). Process simulation-based scenario analysis of scaled-up bioethanol production from water hyacinth. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(15), 17677–17692. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03891-w>
- Acaru, S. F., Abdullah, R., Lai, D. T. C., & Lim, R. C. (2022). Hydrothermal biomass processing for green energy transition: insights derived from principal component analysis of international patents. *Heliyon*, *8*(9), e10738. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10738>
- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2017). Lignocellulosic biomass. Part I: Biomass transformation. *Journal of Science with Technological Applications*, *3*, 27–43. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.17.3.22>
- Aguilar-Reynosa, A., Romani, A., Ma. Rodriguez-Jasso, R., Aguilar, C. N., Garrote, G., & Ruiz, H. A. (2017). Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview. *Energy Conversion and Management*, *136*, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.004>
- Ai, B., Li, W., Woome, J., Li, M., Pu, Y., Sheng, Z., Zheng, L., Adedeji, A., Ragauskas, A. J., & Shi, J. (2020). Natural deep eutectic solvent mediated extrusion for continuous high-solid pretreatment of lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, *22*(19), 6372–6383. <https://doi.org/10.1039/D0GC01560A>
- Alencar, B. R. A., Reis, A. L. S., de Souza, R. de F. R., Morais, M. A., Menezes, R. S. C., & Dutra, E. D. (2017). Recycling the liquid fraction of alkaline hydrogen peroxide in the pretreatment of corn stover. *Bioresour. Technol.*, *241*, 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.022>
- Amini, A., Latifi, M., & Chaouki, J. (2021). Electrification of materials processing via microwave irradiation: A review of mechanism and applications. *Applied Thermal Engineering*, *193*, 117003. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117003>
- Arce, C., & Kratky, L. (2022). Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass toward enzymatic/fermentative valorization. *iScience*, *25*(7), 104610. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104610>
- Awasthi, M., Jeewanjot, K., & Rana, S. (2013). BIOETHANOL PRODUCTION THROUGH WATER HYACINTH, EICHHORNIA CRASSIPES VIA OPTIMIZATION OF THE PRETREATMENT CONDITIONS. *Internacional Revista de tecnología emergente e ingeniería avanzada*, *3*(3), 42–46. https://www.academia.edu/34146219/BIOETHANOL_PRODUCTION_THROUGH_WATER_HYACINTH_EICHHORNIA_CRASSIPES_VIA_OPTIMIZATION_OF_THE_PRETREATMENT_CONDITIONS

- Awasthi, M., Kaur, J., & Rana, S. (2013). BIOETHANOL PRODUCTION THROUGH WATER HYACINTH, EICHHORNIA CRASSIPES VIA OPTIMIZATION OF THE PRETREATMENT CONDITIONS . *Exploring Research And Innovations*, 3(3), 42–46. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54070522/IJETAE_ICERTSD_0213_07-libre.pdf?1502018931=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBIOETHANOL_PRODUCTION_THROUGH_WATER_HYAC.pdf&Expires=1742925182&Signature=Y0AEXWnP040etgr4V-nlR0Lnmi8ozMjXQSXfhEdNAhRknTUUIZIP5VI7eSa1tlSNsKOJHD0GAhqJ7wEGPzsi~MKC7KwvfWrXFGm-0GFMm16zvp2x75bzOQU3la3Du33P3gKNV5XIQrfELIaYXdWw-wqYy5Cw9TsMmusRnOEIo5kuaHur~5uwKINooOLCFY7Nc87aHoVbJR7JWPtrFdzbVWCcvquT0qPnX7dHDX-H9a55xYLSXVnBfUtLso7RI6Bcrjm7ZZXCHfxmCDciZQ1k4gJxA2eVrJVr5eFYarzjiKLUYy4FBvFZj76DDLF8AqzQ92GiXXCxxj~atwZuXI9CQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Awoyale, A. A., & Lokhat, D. (2021). Experimental determination of the effects of pretreatment on selected Nigerian lignocellulosic biomass in bioethanol production. *Scientific Reports*, 11(1), 557. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78105-8>
- Bachiller Huerta Nuñez, E. E. (2019). “*Uso de la Planta Eichhornia Crassipes ‘Jacinto de Agua’ para la Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el Agua Residual Porcina de la Empresa Campoy, Distrito de Aucallama, Huaral*” [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/4030>
- Banu J, R., Sugitha, S., Kavitha, S., Kannah R, Y., Merrylin, J., & Kumar, G. (2021). Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Enhanced Bioenergy Recovery: Effect of Lignocelluloses Recalcitrance and Enhancement Strategies. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.646057>
- Baruah, J., Nath, B. K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R. C., Baruah, D. C., & Kalita, E. (2018). Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products. *Frontiers in Energy Research*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>
- Bayona, M. (2021). *Pretratamientos físico-químicos de residuos agrícolas para la obtención de biocombustibles*. [Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/108857/files/TAZ-TFG-2021-3518.pdf>
- Belalcazar, P. A. R., Maceno, M. M. C., & Fiori, B. de A. (2025). Normalization Methods Applied to the Life Cycle Impact Assessment Phase: A Systematic Literature Review. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(3), e011561. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n3-029>
- Bossio Sanchez, A. (2021). *EICHHORNIA CRASSIPES CONTAMINADA CON MERCURIO COMO UN GENERADOR DE BIOGAS* [Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a8a3e9a-5e3a-4b88-bb4b-8e1d8ab2db08/content>
- Brodeur, G., Yau, E., Badal, K., Collier, J., Ramachandran, K. B., & Ramakrishnan, S. (2011). Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. *Enzyme Research*, 2011, 1–17. <https://doi.org/10.4061/2011/787532>

- Carreño-Sayago, U. F., & Rodríguez-Parra, C. (2019). *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: un sistema integral de fitorremediación y bioenergía. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(3), 399–411. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.051>
- Castro Maldonado, J. J., Gómez Macho, L. K., & Camargo Casallas, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140–174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Ceaser, R., Montané, D., Constantí, M., & Medina, F. (2024). Current progress on lignocellulosic bioethanol including a technological and economical perspective. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04792-2>
- Cevallos Cabrera, A. P. (2020). “DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE FERMENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL HIDROLIZADO ENZIMÁTICO CON *Trichoderma* DEL JACINTO DE AGUA (*Eichhornia crassipes*) PROVENIENTE DEL EMBALSE AMALUZA”. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA.
- Chaturvedi, V., & Verma, P. (2013). An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products. *3 Biotech*, 3(5), 415–431. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0167-8>
- CHEN, X., LIN, Q., Rizwan, M., ZHAO, X., & LI, G. (2019). Steam explosion of crop straws improves the characteristics of biochar as a soil amendment. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(7), 1486–1495. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62573-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62573-6)
- Chen, X., Yuan, X., Chen, S., Yu, J., Zhai, R., Xu, Z., & Jin, M. (2021). Densifying Lignocellulosic biomass with alkaline Chemicals (DLC) pretreatment unlocks highly fermentable sugars for bioethanol production from corn stover. *Green Chemistry*, 23(13), 4828–4839. <https://doi.org/10.1039/D1GC01362A>
- da Silva, A. S., Espinheira, R. P., Teixeira, R. S. S., de Souza, M. F., Ferreira-Leitão, V., & Bon, E. P. S. (2020). Constraints and advances in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: a critical review. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01697-w>
- Dagnino, E., Chamorro, E., Romano, S., Felissia, F., & Area, M. (2021). Optimización del Pretratamiento Ácido de Biomasa Lignocelulósica para la Producción de Bioetanol. *Revista Tecnología y Ciencia*. <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Art10.pdf>
- Dawid, M., & Grzegorz, K. (2021). Microwave-assisted hydrotropic pretreatment as a new and highly efficient way to cellulosic ethanol production from maize distillery stillage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(8), 3381–3392. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11258-2>
- Dhull, S., & Maiti, S. K. (2025). A cost-effective room temperature alkali pretreatment method for enhanced bioethanol production from rice straw. *Energy & Environment*, 36(7), 3130–3150. <https://doi.org/10.1177/0958305X251343072>

- Di Domenico, G., Cioccolo, E., Bianchini, L., Venanzi, R., Colantoni, A., Picchio, R., Cozzolino, L., & Di Stefano, V. (2025). A Systematic Review of Mechanical Pretreatment Techniques of Wood Biomass for Bioenergy. *Energies*, *18*(13), 3294. <https://doi.org/10.3390/en18133294>
- Du, C., Nan, X., Wang, K., Zhao, Y., & Xiong, B. (2019). Evaluation of the digestibility of steam-exploded wheat straw by ruminal fermentation, sugar yield and microbial structure *in vitro*. *RSC Advances*, *9*(71), 41775–41782. <https://doi.org/10.1039/C9RA08167D>
- Duque, A., Manzanares, P., & Ballesteros, M. (2017). Extrusion as a pretreatment for lignocellulosic biomass: Fundamentals and applications. *Renewable Energy*, *114*, 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.050>
- Duque García, A. (2015). *PRETRATAMIENTO DE EXTRUSIÓN REACTIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE PAJA DE CEBADA* [Universidad de Valladolid]. file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Tesis707-151005.pdf
- E. Verdejo, J.A. Palmerín, J. Aibar, A. Cirujeda, A. Taberner, & C. Zaragoza. (2006). *El lirio de Agua Eichhornia crassipes. Plantas Invasoras. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica.* https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_FSV%5CFSV_2006_1_1_8.pdf
- Espinosa Negrín, A. M., López González, L. M., & Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). PRETRATAMIENTO DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS: BREVE REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS UTILIZADOS. *Revista de Centro Azúcar*, *48*(3), 108–119. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-108.pdf>
- Espinosa Negrín, A. M., López Gonzalez, M. L., & Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). PRETRATAMIENTO DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS: BREVE REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS UTILIZADOS. *Scielo*, *48*(3), 108–119. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000300108
- Espinoza, Y., Gómez, F., Sánchez, E., & Romero, A. (2025). Co-producción de bioetanol y bioproductos en procesos intensificados: hacia la factibilidad económica de la bioindustria. *Digital ciencia*, *18*(1). <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/11621/2/DCU-V18N1-2.pdf>
- Fazili, M. A., Bashir, I., Ahmad, M., Yaqoob, U., & Geelani, S. N. (2022). In vitro strategies for the enhancement of secondary metabolite production in plants: a review. *Bulletin of the National Research Centre*, *46*(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s42269-022-00717-z>
- Fernandes, A., Cruz-Lopes, L., Esteves, B., & Evtuguin, D. V. (2023). Microwaves and Ultrasound as Emerging Techniques for Lignocellulosic Materials. *Materials*, *16*(23), 7351. <https://doi.org/10.3390/ma16237351>
- Fu, X., Zhang, J., Gu, X., Yu, H., & Chen, S. (2021). A comprehensive study of the promoting effect of manganese on white rot fungal treatment for enzymatic hydrolysis of woody and grass lignocellulose. *Biotechnology for Biofuels*, *14*(1), 176. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02024-7>

- Gajendra Kumar Gaurav, Tariq Mehmood, Liu Cheng, Jiří Jaromír Klemeš, & Devesh Kumar Shrivastava. (2020). Water hyacinth as a biomass: A review. *Science Direct*, 277(122214). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620322617>
- Galbe, M., & Wallberg, O. (2019). Pretratamiento para biorrefinerías: una revisión de métodos comunes para el uso eficiente de materiales lignocelulósicos. *Biotechnol Biofuels*, 12(294). <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-019-1634-1#citeas>
- Gallego, M., Moreno, A. D., Manzanares, P., Negro, M. J., & Duque, A. (2023). Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*, 369, 128397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128397>
- García Negrón, V., Stoklosa, R. J., & Toht, M. J. (2024). Effects of NaOH and Na₂CO₃ pretreatment on the saccharification of sweet sorghum bagasse. *Frontiers in Chemical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.3389/fceng.2024.1449114>
- Ghosh, S., Roy, S., & Moulik, S. (2025). Alkaline pretreatment wastewater from lignocellulosic biomass: challenges and emerging management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36775-9>
- Gielen, G. J. H. P., Andrews, J. P., Karbiwnyk, C. M., Riddell, M. J. C., Husheer, S. W., & Gapes, D. J. (2022). Hydrothermal conversion of toilet waste: effect of processing conditions on gas phase emissions. *Heliyon*, 8(6), e09708. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09708>
- Gkantzou, E., Chatzikonstantinou, A. V., Fotiadou, R., Giannakopoulou, A., Patila, M., & Stamatis, H. (2021). Trends in the development of innovative nanobiocatalysts and their application in biocatalytic transformations. *Biotechnology Advances*, 51, 107738. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107738>
- Gong, W., Liu, C., Mu, X., Du, H., Lv, D., Li, B., & Han, S. (2015). Hydrogen Peroxide-Assisted Sodium Carbonate Pretreatment for the Enhancement of Enzymatic Saccharification of Corn Stover. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(12), 3477–3485. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01278>
- Gu, B.-J., Wolcott, M. P., & Ganjyal, G. M. (2018). Pretreatment with lower feed moisture and lower extrusion temperatures aids in the increase in the fermentable sugar yields from fine-milled Douglas-fir. *Bioresource Technology*, 269, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.109>
- Hamid, A., Zafar, A., Latif, S., Peng, L., Wang, Y., Liaqat, I., Afzal, M. S., ul-Haq, I., & Aftab, M. N. (2023). Enzymatic hydrolysis of low temperature alkali pretreated wheat straw using immobilized β -xylanase nanoparticles. *RSC Advances*, 13(2), 1434–1445. <https://doi.org/10.1039/D2RA07231A>
- Harun, I., Pushiri, H., Amirul-Aiman, A. J., & Zulkeflee, Z. (2021a). Invasive Water Hyacinth: Ecology, Impacts and Prospects for the Rural Economy. *Plants*, 10(8), 1613. <https://doi.org/10.3390/plants10081613>

- Harun, I., Pushiri, H., Amirul-Aiman, A. J., & Zulkeflee, Z. (2021b). Invasive Water Hyacinth: Ecology, Impacts and Prospects for the Rural Economy. *Plants*, *10*(8), 1613. <https://doi.org/10.3390/plants10081613>
- Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, *262*, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>
- Ho, M. C., Ong, V. Z., & Wu, T. Y. (2019a). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *112*, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.082>
- Ho, M. C., Ong, V. Z., & Wu, T. Y. (2019b). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *112*, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.082>
- Hoang, A. T., Nižetić, S., Ong, H. C., Mofijur, M., Ahmed, S. F., Ashok, B., Bui, V. T. V., & Chau, M. Q. (2021a). Insight into the recent advances of microwave pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass into sustainable biofuel. *Chemosphere*, *281*, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130878>
- Hoang, A. T., Nižetić, S., Ong, H. C., Mofijur, M., Ahmed, S. F., Ashok, B., Bui, V. T. V., & Chau, M. Q. (2021b). Insight into the recent advances of microwave pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass into sustainable biofuel. *Chemosphere*, *281*, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130878>
- Hoyamo, G., Adane, L., Demirew, Z., & Danato, M. (2024). Investigation of potentials Water hyacinth (*Ecchornia crassipes*) grown at Lake Koka and Lake Abaya for bioethanol production. *Research Journal of Chemical Sciences*, *14*(3). <https://www.isca.me/rjcs/Archives/v14/i3/2.ISCA-RJCS-2024-006.pdf>
- Hu, J. J., He, Z., Zhang, Q., Dang, J. T., Zhao, S. H., Yang, S., Yang, P. B., & Yan, X. Y. (2023). Simultaneous pretreatment with ultraviolet light and alkaline H₂O₂ to promote enzymatic hydrolysis of corn stover. *BioResources*, *18*(3), 4754–4770. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.4754-4770>
- Huamani Leon, E., Huayta Astopillo, D., & Huayta Astopillo, D. (2021). *Eficiencia de remoción de la especie Hydrocotyle bonariensis (redondita de agua) y Eichhornia crassipes (jacinto de agua) en las aguas residuales del río Shullcas - 2021* [Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11100/1/IV_FIN_107_TE_Huamani_Huayta_Ortega_2021.pdf
- Islam, M., Sinha, A. S. K., & Prasad, K. (2024). Organosolv delignification of rice straw cellulose fiber for functional food packaging. *Cellulose*, *31*(15), 9191–9214. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06125-y>
- Jablonowski, N. D., Pauly, M., & Dama, M. (2022). Microwave Assisted Pretreatment of Szarvasi (*Agropyron elongatum*) Biomass to Enhance Enzymatic Saccharification and Direct Glucose Production. *Frontiers in Plant Science*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.767254>

- Jacquet, N., Maniet, G., Vanderghem, C., Delvigne, F., & Richel, A. (2015). Application of Steam Explosion as Pretreatment on Lignocellulosic Material: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(10), 2593–2598. <https://doi.org/10.1021/ie503151g>
- Johannes, L. P., & Xuan, T. D. (2024). Comparative Analysis of Acidic and Alkaline Pretreatment Techniques for Bioethanol Production from Perennial Grasses. *Energies*, 17(5), 1048. <https://doi.org/10.3390/en17051048>
- Juriscic, V., Julson, J. L., Kricka, T., Curic, D., Voca, N., & Karunanithy, C. (2015). Effect of Extrusion Pretreatment on Enzymatic Hydrolysis of Miscanthus for the Purpose of Ethanol Production. *Journal of Agricultural Science*, 7(11). <https://doi.org/10.5539/jas.v7n11p132>
- Kakar, F. L., Tadesse, F., & Elbeshbishy, E. (2022). Comprehensive Review of Hydrothermal Pretreatment Parameters Affecting Fermentation and Anaerobic Digestion of Municipal Sludge. *Processes*, 10(12), 2518. <https://doi.org/10.3390/pr10122518>
- Karouach, F., Ben Bakrim, W., Ezzariai, A., Sobeh, M., Kibret, M., Yasri, A., Hafidi, M., & Kouisni, L. (2022a). A Comprehensive Evaluation of the Existing Approaches for Controlling and Managing the Proliferation of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.767871>
- Karouach, F., Ben Bakrim, W., Ezzariai, A., Sobeh, M., Kibret, M., Yasri, A., Hafidi, M., & Kouisni, L. (2022b). A Comprehensive Evaluation of the Existing Approaches for Controlling and Managing the Proliferation of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.767871>
- Karp, E. M., Resch, M. G., Donohoe, B. S., Ciesielski, P. N., O'Brien, M. H., Nill, J. E., Mittal, A., Bidy, M. J., & Beckham, G. T. (2015). Alkaline Pretreatment of Switchgrass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(7), 1479–1491. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00201>
- Khaowdang, S., Suriyachai, N., Imman, S., Kreetachat, N., Chuetor, S., Wongcharee, S., Suwannahong, K., Nukunudompanich, M., & Kreetachat, T. (2025). Valorization of Sugarcane Bagasse in Thailand: An Economic Analysis of Ethanol and Co-Product Recovery via Organosolv Fractionation. *Sustainability*, 17(15), 7145. <https://doi.org/10.3390/su17157145>
- Khoshnevisan, B., Shafiei, M., Rajaeifar, M. A., & Tabatabaei, M. (2016). Biogas and bioethanol production from pinewood pre-treated with steam explosion and N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO): A comparative life cycle assessment approach. *Energy*, 114, 935–950. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.024>
- Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 199, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>
- Kim, S., Kim, S.-D., & Sohn, S. Y. (2020). Evaluation of the wastewater generated during alkaline pretreatment of biomass for feasibility of recycling and reusing. *Renewable Energy*, 155, 1156–1164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.018>

- Konan, D., Koffi, E., Ndao, A., Peterson, E. C., Rodrigue, D., & Adjallé, K. (2022). An Overview of Extrusion as a Pretreatment Method of Lignocellulosic Biomass. *Energies*, *15*(9), 3002. <https://doi.org/10.3390/en15093002>
- Kral, I., Piringer, G., Saylor, M. K., Lizasoain, J., Gronauer, A., & Bauer, A. (2020). Life Cycle Assessment of Biogas Production from Unused Grassland Biomass Pretreated by Steam Explosion Using a System Expansion Method. *Sustainability*, *12*(23), 9945. <https://doi.org/10.3390/su12239945>
- Krátký, L. (2022). Mechanical Size Reduction Of Lignocellulosic Biomass: A Mini-Review. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, *94*. <https://www.cetjournal.it/cet/22/94/038.pdf>
- Kululo, W. W., Habtu, N. G., Abera, M. K., Sendekie, Z. B., Fanta, S. W., & Yemata, T. A. (2025a). Advances in various pretreatment strategies of lignocellulosic substrates for the production of bioethanol: a comprehensive review. *Discover Applied Sciences*, *7*(5), 476. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06748-1>
- Kululo, W. W., Habtu, N. G., Abera, M. K., Sendekie, Z. B., Fanta, S. W., & Yemata, T. A. (2025b). Advances in various pretreatment strategies of lignocellulosic substrates for the production of bioethanol: a comprehensive review. *Discover Applied Sciences*, *7*(5), 476. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06748-1>
- Kumar, A. K., & Sharma, S. (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, *4*(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
- Kumar, B., Bhardwaj, N., Agrawal, K., & Verma, P. (2020). Bioethanol Production: Generation-Based Comparative Status Measurements. En *Biofuel production technologies: A critical analysis for sustainability*. (pp. 155–201). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8637-4_7
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact*. <https://doi.org/10.3133/cir645>
- Li, J., Lu, M., Guo, X., Zhang, H., Li, Y., & Han, L. (2018). Insights into the improvement of alkaline hydrogen peroxide (AHP) pretreatment on the enzymatic hydrolysis of corn stover: Chemical and microstructural analyses. *Bioresource Technology*, *265*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.082>
- Li, W., Tan, X., Miao, C., Zhang, Z., Wang, Y., Ragauskas, A. J., & Zhuang, X. (2023). Mild organosolv pretreatment of sugarcane bagasse with acetone/phenoxyethanol/water for enhanced sugar production. *Green Chemistry*, *25*(3), 1169–1178. <https://doi.org/10.1039/D2GC04404H>
- Liu, T., Williams, D. L., Pattathil, S., Li, M., Hahn, M. G., & Hodge, D. B. (2014). Coupling alkaline pre-extraction with alkaline-oxidative post-treatment of corn stover to enhance enzymatic hydrolysis and fermentability. *Biotechnology for Biofuels*, *7*(1), 48. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-48>
- Luzardo Gorozabel, B. P., Ruíz Reyes, E., & Pérez Parra, J. C. (2023). TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA

- GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(ESPECIAL), 3–22. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>
- Madyira, D. M., & Olatunji, K. O. (2025). Alkali Pretreatment of Lignocellulose Feedstock Improves Morphological Structure and Biomethane Yield. *Sustainability*, 17(2), 534. <https://doi.org/10.3390/su17020534>
- Mahmoodi, P., Karimi, K., & Taherzadeh, M. J. (2018). Hydrothermal processing as pretreatment for efficient production of ethanol and biogas from municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 261, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.115>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021a). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334, 125235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021b). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334, 125235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Martín, C., Dixit, P., Momayez, F., & Jönsson, L. J. (2022). Hydrothermal Pretreatment of Lignocellulosic Feedstocks to Facilitate Biochemical Conversion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.846592>
- Mayer-Laigle, C., Blanc, N., Rajaonarivony, R. K., & Rouau, X. (2018). Comminution of Dry Lignocellulosic Biomass, a Review: Part I. From Fundamental Mechanisms to Milling Behaviour. *Bioengineering*, 5(2), 41. <https://doi.org/10.3390/bioengineering5020041>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Melendez, J. R. (2021). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1G y 2G. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVIII(4), 415–429. <https://www.redalyc.org/journal/280/28073811026/html/>
- Mendoza López, K. V. (2023). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RESIDUO DE LECHUGUINES (Eichhornia crassipes) CULTIVADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FINES ENERGETICOS [UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE]*. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/14186/2/03%20IER%20035%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf#page=11.08>
- Meng, F., Li, N., Yang, H., Shi, Z., Zhao, P., & Yang, J. (2022). Investigation of hydrogen peroxide-acetic acid pretreatment to enhance the enzymatic digestibility of bamboo residues. *Bioresource Technology*, 344, 126162. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126162>
- Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2022). Delignification efficiency of various types of biomass using microwave-assisted hydrotropic pretreatment. *Scientific Reports*, 12(1), 4561. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08717-9>
- Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2023). High-pressure microwave-assisted pretreatment of softwood, hardwood and non-wood biomass using different solvents in the production of

- cellulosic ethanol. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02272-9>
- Moiceanu, G., Paraschiv, G., Voicu, G., Dinca, M., Negoita, O., Chitoiu, M., & Tudor, P. (2019). Energy Consumption at Size Reduction of Lignocellulose Biomass for Bioenergy. *Sustainability*, 11(9), 2477. <https://doi.org/10.3390/su11092477>
- Molano de la Roche, M., & Cárdenas Benavides, M. C. (2020). Estado del arte del método mixto en la investigación: método cualitativo y método cuantitativo. *Semillas del Saber*, 1(1), 29–35. [file:///D:/USUARIO%20LEGALIZACION/Downloads/REVISTA+SEMILLAS+-+Vers+final-28-35%20\(1\).pdf](file:///D:/USUARIO%20LEGALIZACION/Downloads/REVISTA+SEMILLAS+-+Vers+final-28-35%20(1).pdf)
- Monroy, A., Martínez Z, J. J., & Caicedo Pineda, G. A. (2022a). Estrategias de aprovechamiento del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) hacia la producción de bioetanol. *Ciencia en Desarrollo*, 13(2), 185–200. <https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.14088>
- Monroy, A., Martínez Z, J. J., & Caicedo Pineda, G. A. (2022b). Estrategias de aprovechamiento del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) hacia la producción de bioetanol. *Ciencia en Desarrollo*, 13(2), 185–200. <https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.14088>
- Montes Suárez, D. (2025, marzo 25). *Atlántico inaugura el primer ecoproyecto turístico del Caribe colombiano en la Ciénaga de Mallorquín*. Valora . <https://www.valoraanalitik.com/atlantico-inaugura-primer-ecoproyecto/>
- Morillas, A. (2007). *MUESTREO EN POBLACIONES FINITAS. 20017*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57858943/Apuntes_Muestreo-libre.pdf?1543255228=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMUESTREO_EN_POBLACIONES_FINITAS.pdf&Expires=1752097522&Signature=V17AgE9fMUWdhI9ehyK0Y118Bbw6sNyrN-7C12EJTPvKkkzRNlx9xw8EwPQS83MociOko5C~5grZ4ljnVAiW1apuv44AnDndLcIFx7NWuDXZ91bxhll6sg2qK25j2FgBPVclUjdQLvamh-QeNW8maMW5XMBtGyWTHNvipphOUPL1sqXWdt3mauhm4ObdmO7tZ9d4q68ZRG-R7gY2V0W2PmVHGI7rfH7FLZRv46UROqPt36hvPYXqsNJusUAwjhl~3c3~C0uRyBkj8l2DaiIhrtcNXNRcAqNoDFNvtQbEtOUZdflzqC3mD9dA5XZOyk0TuBWgliaLStcx9NLxIRJ9Tw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Mussatto, S. I. (2016). Biomass Pretreatment With Acids. En *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery* (pp. 169–185). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00008-6>
- Nair, L. G., Agrawal, K., & Verma, P. (2023). Organosolv pretreatment: an in-depth purview of mechanics of the system. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00673-0>
- Nie, Y., & Bi, X. (2018). Life-cycle assessment of transportation biofuels from hydrothermal liquefaction of forest residues in British Columbia. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1019-x>
- Oladzad, S., Fallah, N., Mahboubi, A., Afsham, N., Taherzadeh, M. J., & Toghyani, J. (2024a). Comparison of acid and hydrothermal pretreatments of date waste for value creation. *Scientific Reports*, 14(1), 18056. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68879-6>

- Oladzad, S., Fallah, N., Mahboubi, A., Afsham, N., Taherzadeh, M. J., & Toghyani, J. (2024b). Comparison of acid and hydrothermal pretreatments of date waste for value creation. *Scientific Reports*, *14*(1), 18056. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68879-6>
- Onyari, E. K., Fayomi, G. U., & Jaiyeola, A. T. (2024). Unveiling the situation of water hyacinth on fresh water bodies in Nigeria and South Africa: Management, workable practices and potentials. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *10*, 100974. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100974>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *OBJETIVOS DE DESAROLLO SOSTENIBLE*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Oriez, V., Peydecastaing, J., & Pontalier, P.-Y. (2019). Lignocellulosic Biomass Fractionation by Mineral Acids and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. *Molecules*, *24*(23), 4273. <https://doi.org/10.3390/molecules24234273>
- Osman, A. I., Fang, B., Zhang, Y., Liu, Y., Yu, J., Farghali, M., Rashwan, A. K., Chen, Z., Chen, L., Ihara, I., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2024). Life cycle assessment and techno-economic analysis of sustainable bioenergy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(3), 1115–1154. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01694-z>
- Ospino, K., Gómez, E., & Rios, L. (2020). Evaluación de técnicas de pretratamiento en buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para la producción de bioetanol. *Información tecnológica*, *31*(1), 215–226. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100215>
- Paczkowski, S., Comi, J., Küttner, I., Knappe, V., Russ, M., Robles, L. A. D., Jaeger, D., & Pelz, S. (2023). Hydrothermal treatment (HTT) for improving the fuel properties of biomass residues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(7), 6257–6279. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02494-1>
- Pantoja, A., Cuatin, F., & Muñoz, D. (2015). EFECTO DEL PRETRATAMIENTO QUÍMICO Y ENZIMÁTICO EN LA DESLIGNIFICACIÓN DE BIOMASA AGROINDUSTRIAL TÍPICA DEL CAUCA. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *13*(1), 43–53. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v13n1/v13n1a06.pdf>
- Pérez-Merchán, A. M., Rodríguez-Carballo, G., Torres-Olea, B., García-Sancho, C., Maireles-Torres, P. J., Mérida-Robles, J., & Moreno-Tost, R. (2022). Recent Advances in Mechanochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Energies*, *15*(16), 5948. <https://doi.org/10.3390/en15165948>
- Phojaroen, J., Jiradechakorn, T., Kirdponpattara, S., Sriariyanun, M., Junthip, J., & Chuetor, S. (2022). Performance Evaluation of Combined Hydrothermal-Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Enzymatic Enhancement. *Polymers*, *14*(12), 2313. <https://doi.org/10.3390/polym14122313>
- Porninta, K., Khemacheewakul, J., Techapun, C., Phimolsiripol, Y., Jantanasakulwong, K., Sommanee, S., Mahakuntha, C., Feng, J., Htike, S. L., Moukamnerd, C., Zhuang, X., Wang, W., Qi, W., Li, F.-L., Liu, T., Kumar, A., Nunta, R., & Leksawasdi, N. (2024). Pretreatment and enzymatic hydrolysis optimization of lignocellulosic biomass for ethanol, xylitol, and phenylacetylcarbinol co-production using *Candida magnoliae*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1332185>

- Prasad, A., Sotenko, M., Blenkinsopp, T., & Coles, S. R. (2016). Life cycle assessment of lignocellulosic biomass pretreatment methods in biofuel production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 44–50. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0985-5>
- Qian, H., Fan, Y., Chen, J., He, L., Sun, Y., & Li, L. (2022). Enabling the complete valorization of hybrid Pennisetum: Directly using alkaline black liquor for preparing UV-shielding biodegradable films. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1027511>
- Rabelo, S. C., Nakasu, P. Y. S., Scopel, E., Araújo, M. F., Cardoso, L. H., & Costa, A. C. da. (2023). Organosolv pretreatment for biorefineries: Current status, perspectives, and challenges. *Bioresource Technology*, 369, 128331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128331>
- Rivadeneira, L., & Loor, I. (2025). Los Datos de X en la Investigación Científica: Tendencias y Desafíos. *Revista Latina de Comunicación Social*, 83, 1–14. <https://doi.org/10.4185/rlcs-2025-2418>
- Rodrigues Gurgel da Silva, A., Errico, M., & Rong, B.-G. (2018). Techno-economic analysis of organosolv pretreatment process from lignocellulosic biomass. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1401–1412. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1389-y>
- Rouabhia, A., Álvarez-Gallego, C. J., Fernández-Güelfo, L. A., Valdez Castillo, M., & Ramirez, A. A. (2025). Unlocking the Potential of Lignocellulosic Biomass: Microwave and Hydrothermal Pretreatment to Improve the Production of High Value-Added Biorefinery Compounds. *Energy & Fuels*, 39(42), 20383–20396. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c03953>
- Ruggerio, C. A. (2021a). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of The Total Environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Ruggerio, C. A. (2021b). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of The Total Environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Rustamova, N., Huang, G., Isokov, M., Movlanov, J., Farid, R., Buston, I., Xiang, H., Davranov, K., & Yili, A. (2024). Modification of natural compounds through biotransformation process by microorganisms and their pharmacological properties. *Fitoterapia*, 179, 106227. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.106227>
- Sánchez-Muñoz, S., Mier-Alba, E., da Silva, S. S., & Chandel, A. K. (2021). Commercial Washing Detergents-Assisted Alkaline Pretreatment for Lignocellulosic Sugars Production: A First Report. *Sugar Tech*, 23(6), 1425–1431. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00988-2>
- Santana, J. C. (2020). *Pré-tratamento de biomassa pelo método organosolv utilizando glicerol para obtenção de açúcares redutores* [Universidade Federal De Sergipe]. <http://ri.ufs.br/handle/riufs/14816>
- Sarker, T. R., Pattnaik, F., Nanda, S., Dalai, A. K., Meda, V., & Naik, S. (2021). Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and

- subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*, 284, 131372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>
- Scapini, T., dos Santos, M. S. N., Bonatto, C., Wancura, J. H. C., Mulinari, J., Camargo, A. F., Klanovicz, N., Zabot, G. L., Tres, M. V., Fongaro, G., & Treichel, H. (2021). Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. *Bioresource Technology*, 342, 126033. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033>
- ShakilaBegam, M., Boorani, E. A., Akilandeswari, P., & Pradeep, B. V. (2024). Bioethanol Production from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) using Different Microbial Inoculants. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18(1), 323–331. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.1.16>
- Sharma, V., Abbas, R., Sodr e, J. R., Ayad, S. M. M. E., & Belchior, C. (2022). Model for Energy Consumption and Costs of Bioethanol production from Wastepaper. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(4), 1–11. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d10.0431>
- Show, B. K., Shivakumaran, G., Koley, A., Ghosh, A., Chaudhury, S., Hazra, A. K., & Balachandran, S. (2023). Effect of thermal and NaOH pretreatment on water hyacinth to enhance the biogas production. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(57), 120984–120993. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30810-3>
- Solarte-Toro, J. C., Romero-Garc a, J. M., Mart nez-Pati o, J. C., Ruiz-Ramos, E., Castro-Galiano, E., & Cardona-Alzate, C. A. (2019). Acid pretreatment of lignocellulosic biomass for energy vectors production: A review focused on operational conditions and techno-economic assessment for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 587–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.024>
- Su arez-Forero, S. J., Candela-Soto, A. M., Henao-Mart nez, J. A., & Bayona-Ayala, O. L. (2019). Evaluation of the performance of the preteretment with the hydrogen peroxide on sugar cane bagasse for removing lignin. *ITECKNE*, 16(1), 21–28. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>
- Sui, W., & Chen, H. (2016). Effects of water states on steam explosion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 199, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.001>
- Sun, W., Trevorah, R., & Othman, M. Z. (2018). Fractionation of spent liquor from organosolv-pretreatment using lignin-incompatible extraction. *Bioresource Technology*, 269, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.097>
-  wi atek, K., Gaag, S., Klier, A., Kruse, A., Sauer, J., & Steinbach, D. (2020). Acid Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Sugars and Furfurals Formation. *Catalysts*, 10(4), 437. <https://doi.org/10.3390/catal10040437>
- Tareen, A. K., Punsuvon, V., & Parakulsuksatid, P. (2020). Investigation of alkaline hydrogen peroxide pretreatment to enhance enzymatic hydrolysis and phenolic compounds of oil palm trunk. *3 Biotech*, 10(4), 179. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02169-6>

- Tofani, G., Jasiukaitytė-Grojzdek, E., Grilc, M., & Likozar, B. (2024). Organosolv biorefinery: resource-based process optimisation, pilot technology scale-up and economics. *Green Chemistry*, 26(1), 186–201. <https://doi.org/10.1039/D3GC03274D>
- Ujor, V. C., & Okonkwo, C. C. (2022). Microbial detoxification of lignocellulosic biomass hydrolysates: Biochemical and molecular aspects, challenges, exploits and future perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1061667>
- Ummalyma, S. B., Herojit, N., & Sukumaran, R. K. (2024). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of bamboo residues and its influence on physiochemical properties and enzymatic digestibility for bioethanol production. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1444813>
- Vaidya, A. A., Murton, K. D., Smith, D. A., & Dedual, G. (2022). A review on organosolv pretreatment of softwood with a focus on enzymatic hydrolysis of cellulose. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(11), 5427–5442. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02373-9>
- Venegas, D., Ayabaca, C., Tipanluisa, L., & Alejandro, S. (2024). Microondas como pretratamiento de biomasa lignocelulósica: Influencia del tiempo y la potencia de microondas en la eliminación de humedad. *CIBIM 2024*. <https://oai.e-spacio.uned.es/server/api/core/bitstreams/9cdf7056-da5b-486d-a35f-0577e2b4fdc7/content>
- Venegas-Vásquez, D., Orejuela-Escobar, L. M., Villasana, Y., Salgado, A., Tipanluisa-Sarchi, L., Romero-Carrillo, R., & Alejandro-Martín, S. (2025). Microwave Pretreatment for Biomass Pyrolysis: A Systematic Review on Efficiency and Environmental Aspects. *Processes*, 13(10), 3194. <https://doi.org/10.3390/pr13103194>
- Villamagna, A. M., & Murphy, B. R. (2010). Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*, 55(2), 282–298. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x>
- Willie, M. M. (2024). Population and Target Population in Research Methodology. *Golden Ratio of Social Science and Education*, 4(1), 75–79. <https://doi.org/10.52970/grsse.v4i1.405>
- Woźniak, A., Kuligowski, K., Świerczek, L., & Cenian, A. (2025). Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production. *Sustainability*, 17(1), 287. <https://doi.org/10.3390/su17010287>
- Xia, M., Peng, M., Xue, D., Cheng, Y., Li, C., Wang, D., Lu, K., Zheng, Y., Xia, T., Song, J., & Wang, M. (2020). Development of optimal steam explosion pretreatment and highly effective cell factory for bioconversion of grain vinegar residue to butanol. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), 111. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01751-7>
- Xu, C., Xiong, Y., Zhang, J., Li, K., Zhong, S., Huang, S., Xie, C., Gong, W., Zhu, Z., Zhou, Y., & Peng, Y. (2023). Liquid hot water pretreatment combined with high-solids enzymatic hydrolysis and fed-batch fermentation for succinic acid sustainable processed from sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 369, 128389. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128389>

- Xu, L., Goode, A. B. C., Tipping, P. W., Smith, M. C., Gettys, L. A., Knowles, B. K., Pokorny, E., Salinas, L., & DeAngelis, D. L. (2024). Less is more: Less herbicide does more when biological control is present in *Pontederia crassipes*. *Ecological Modelling*, *487*, 110566. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110566>
- Yan, J., Wei, Z., Wang, Q., He, M., Li, S., & Irbis, C. (2015). Bioethanol production from sodium hydroxide/hydrogen peroxide-pretreated water hyacinth via simultaneous saccharification and fermentation with a newly isolated thermotolerant *Kluyveromyces marxianu* strain. *Bioresource Technology*, *193*, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.069>
- Yan, X., Cheng, J.-R., Wang, Y.-T., & Zhu, M.-J. (2020). Enhanced lignin removal and enzymolysis efficiency of grass waste by hydrogen peroxide synergized dilute alkali pretreatment. *Bioresource Technology*, *301*, 122756. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122756>
- Yang, B., Tao, L., & Wyman, C. E. (2018). Strengths, challenges, and opportunities for hydrothermal pretreatment in lignocellulosic biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *12*(1), 125–138. <https://doi.org/10.1002/bbb.1825>
- Yang, R., Chen, X., Zhang, D., Wang, H., Zhou, W., Lin, W., & Qi, Z. (2022). Steam-Exploded Pruning Waste as Peat Substitute: Physiochemical Properties, Phytotoxicity and Their Implications for Plant Cultivation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(9), 5328. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095328>
- Yin, X., Wei, L., Pan, X., Liu, C., Jiang, J., & Wang, K. (2021). The Pretreatment of Lignocelluloses With Green Solvent as Biorefinery Preprocess: A Minor Review. *Frontiers in Plant Science*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.670061>
- Yuan, Z., Bals, B. D., Hegg, E. L., & Hodge, D. B. (2022). Technoeconomic evaluation of recent process improvements in production of sugar and high-value lignin co-products via two-stage Cu-catalyzed alkaline-oxidative pretreatment. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *15*(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02139-5>
- Yuan, Z., Singh, S. K., Bals, B., Hodge, D. B., & Hegg, E. L. (2019). Integrated Two-Stage Alkaline–Oxidative Pretreatment of Hybrid Poplar. Part 2: Impact of Cu-Catalyzed Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatment Conditions on Process Performance and Economics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *58*(35), 16000–16008. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00901>
- Zdeb, M., Bis, M., & Przywara, A. (2023). Multi-Criteria Analysis of the Influence of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Techniques on Methane Production. *Energies*, *16*(1), 468. <https://doi.org/10.3390/en16010468>
- Zhang, B., Biswal, B. K., Zhang, J., & Balasubramanian, R. (2023). Hydrothermal Treatment of Biomass Feedstocks for Sustainable Production of Chemicals, Fuels, and Materials: Progress and Perspectives. *Chemical Reviews*, *123*(11), 7193–7294. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00673>
- Zhang, G., Liu, S., Bi, D., He, Z., Liu, J., & Liu, Y. (2024). Effect of pretreatment with hydrogen peroxide at different pHs on corn stalk: Characterizations of structure, composition, and

- pyrolysis properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106274>
- Zhang, H., Huang, S., Wei, W., Zhang, J., & Xie, J. (2019). Investigation of alkaline hydrogen peroxide pretreatment and Tween 80 to enhance enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1), 107. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1454-3>
- Zhang, H., & Wu, J. (2023). Optimization of Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Wheat Straw for Enhancing Sugar Yields. *Fermentation*, 9(10), 871. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100871>
- Zhang, J., Li, K., Liu, S., Huang, S., & Xu, C. (2022). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment combined with bio-additives to boost high-solids enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for succinic acid processing. *Bioresource Technology*, 345, 126550. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126550>
- Zhang, Q., Wei, Y., Han, H., & Weng, C. (2018). Enhancing bioethanol production from water hyacinth by new combined pretreatment methods. *Bioresource Technology*, 251, 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.085>
- Zhao, L., Zhang, X., Xu, J., Ou, X., Chang, S., & Wu, M. (2015). Techno-Economic Analysis of Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass in China: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover. *Energies*, 8(5), 4096–4117. <https://doi.org/10.3390/en8054096>
- Zhao, Z.-M., Yu, W., Huang, C., Xue, H., Li, J., Zhang, D., & Li, G. (2023). Steam explosion pretreatment enhancing enzymatic digestibility of overground tubers of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.). *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1093277>
- Zheng, J., & Rehmman, L. (2014). Extrusion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(10), 18967–18984. <https://doi.org/10.3390/ijms151018967>
- Zhou, S., Brown, R. C., & Bai, X. (2015). The use of calcium hydroxide pretreatment to overcome agglomeration of technical lignin during fast pyrolysis. *Green Chemistry*, 17(10), 4748–4759. <https://doi.org/10.1039/C5GC01611H>
- Zhu, H., He, X., Xu, Z., & Dai, L. (2025). Deep eutectic solvent-mediated hydrothermal treatment for biomass conversion: a review. *Green Chemistry*, 27(5), 1278–1299. <https://doi.org/10.1039/D4GC05662K>
- Ziegler-Devin, I., Chrusciel, L., & Brosse, N. (2021). Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Mini-Review of Theoretical and Experimental Approaches. *Frontiers in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358>

ANEXO

Anexo 1: Registro fotográfico observación en campo

Foto 1: Proliferación del Jacinto de agua – sector 1, zona rural de Gamarra.



Ubicación: Zona rural del municipio de Gamarra, cuerpo de agua conectado con el río Magdalena.

Fecha de observación: 21/06/2025

Observación: En la imagen se evidencia una densa proliferación de Jacinto de agua en un afluente asociado al río Magdalena. La extensa cobertura vegetal reduce significativamente el flujo de agua, generando impactos negativos sobre el ecosistema acuático, la biodiversidad local y el uso del recurso por parte de las comunidades.



Foto 2: Densa cobertura del Jacinto de agua en zona ribereña, Gamarra, Cesar.

Ubicación: Área boscosa contigua a un afluente del río Magdalena, sector rural del municipio de Gamarra.

Fecha de observación: 21/06/2025

Observación: La imagen evidencia una cobertura continua y densa de Jacinto de agua, que invade afluente del río Magdalena, generando una apariencia de “alfombra verde”, ocultando completamente el espejo de agua.

Foto 3: Zona rural de Gamarra, margen interno del cuerpo de agua del río Magdalena.



Ubicación: Zona rural de Gamarra, margen interna de cuerpo de agua conectado al río Magdalena

Fecha de observación: 21/06/2025

Observación: La imagen muestra un tramo de vegetación de Jacinto de agua en avanzado estado de descomposición. Lo que evidencia por el color y la marchites, esto puede ser debido a disminución del cuerpo hídrico estrés ambiental, altas temperaturas o falta de nutrientes.