

**DETERMINACIÓN DEL USO DE LOS RESIDUOS DE FIQUE PROVENIENTES DEL
PROCESO DE DESFIBRADO, COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE
SORBITOL**

DANNA VANESSA DURÁN GONZÁLEZ

ANDRÉS FELIPE GÓMEZ GUTIÉRREZ

Proyecto integral de grado para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Director

DAVID LEONARDO SOTELO TOBON

Químico, MSc., cPhD.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTA D.C.

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

David Leonardo Sotelo Tobón
Firma del Director

Adriana María Mesa Gómez
Firma del Jurado

Juan Camilo Cely Garzón
Firma del Jurado

Bogotá D.C., Febrero de 2022.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano de Facultad de Ingeniería

Dra. Alexandra Mejía Guzmán (E)

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo primeramente a Dios y a nuestro padres y familiares, ya que gracias al apoyo emocional, motivacional y económico hemos logrado la culminación de nuestra carrera universitaria, formando consigo profesionales con valores éticos y morales, también quisiéramos agradecer a todos nuestros docentes, que desde nuestra infancia nos han formado con dedicación y amor, mostrándonos que la educación es el mejor camino para llegar al éxito y finalmente quisiéramos agradecer a todas aquellas personas que han estado junto a nosotros, aquellas personas que han creído en nuestras capacidades y nos han ayudado a llegar a esta gran meta.

AUTORES

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Sorbitol	17
<i>1.1.1 Ruta química</i>	17
<i>1.1.2 Ruta biotecnológica</i>	18
1.2 Biomasa lignocelulósica	19
<i>1.2.1 Proceso de transformación de biomazas lignocelulósicas</i>	19
1.3 Fique	20
1.3.1 Especies de fique	21
1.4 Desfibrado de fique	24
1.5 Saponinas	25
1.6 Biorreactores de lecho fijo	26
1.7 Fermentación	26
<i>1.7.1 Fermentación sumergida discontinua</i>	26
<i>1.7.2 Fermentación sumergida continua</i>	26
2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE FIQUE	28
2.1 pH, Humedad, sólidos totales	30
2.2 Composición mineralógica y proteínas	32
2.3 Determinación de lignina, hemicelulosa y celulosa	34
2.4 Determinación de azúcares	35
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO BIOTECNOLÓGICO	37
3.1 Pretratamiento de deslignificación de los residuos de fique	37
<i>3.1.1 Explosión de vapor</i>	37
<i>3.1.2 Pretratamiento alcalino</i>	38
<i>3.1.3 Pretratamiento Organosolv</i>	38
<i>3.1.4 Agua caliente líquida</i>	38
<i>3.1.5 Oxidación húmeda</i>	39

3.1.6	<i>Expansión de fibra de amoniac</i>	39
3.1.7	<i>Explosión húmeda</i>	39
3.1.8	<i>Pretratamiento de dos pasos</i>	40
3.1.9	<i>Pretratamiento químico</i>	40
3.2	Hidrólisis de los polisacáridos y obtención de azúcares.	42
3.3	Microorganismos productores de sorbitol	44
3.3.1	<i>Tipo de microorganismo y fuente de energía lumínica</i>	44
3.3.2	<i>Temperatura y pH de crecimiento óptimos</i>	45
3.3.3	<i>Condiciones necesarias para obtener sorbitol</i>	45
3.3.4	<i>Necesidad de modificaciones genéticas</i>	45
3.3.5	<i>Clasificación del microorganismo de acuerdo a la necesidad de oxígeno</i>	46
4.	DISEÑO CONCEPTUAL PLANTA DE PRODUCCIÓN DE SORBITOL	51
4.1	Definición de la escala	51
4.2	Factor de operación	51
4.3	Materias primas e insumos	52
4.3.1	<i>Residuos de fique</i>	52
4.3.2	<i>Ácido diluido y base para su neutralización</i>	52
4.3.3	<i>Vapor de agua</i>	52
4.3.4	<i>Enzimas (Hidrólisis enzimática e isomerización de glucosa)</i>	53
4.3.5	<i>Nutrientes del medio de cultivo e Inóculo</i>	53
4.3.6	<i>Inmovilización del microorganismo con alginato de sodio</i>	54
4.4	Diagrama de bloques de la ruta de producción	54
4.5	Equipos involucrados y descripción del proceso	56
4.5.1	<i>Separación 1</i>	56
4.5.2	<i>Separación 2</i>	56
4.5.3	<i>Secado</i>	56
4.5.4	<i>Molienda</i>	57
4.5.5	<i>Separación 3</i>	57
4.5.6	<i>Explosión de vapor (Descompresión)</i>	58
4.5.7	<i>Neutralización y filtración</i>	58
4.5.8	<i>Separación 5</i>	58
4.5.9	<i>Calentamiento (Generación de vapor)</i>	59

4.5.10 <i>Hidrólisis enzimática</i>	59
4.5.11 <i>Isomerización</i>	59
4.5.12 <i>Separación 6</i>	60
4.5.13 <i>Fermentación</i>	60
4.5.14 <i>Evaporación</i>	61
4.5.15 <i>Cristalización</i>	61
4.6 Diagrama PFD	62
4.7 Diagrama Gantt	64
5. COSTOS DEL PROCESO	66
5.1 Costos de capital	66
5.2 Costos de producción	68
5.2.1 <i>Mano de obra</i>	68
5.2.2 <i>Materia prima e insumos</i>	72
6. CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación taxonómica del fique	21
Tabla 2. Estructura física de la hoja de fique (<i>Furcraea</i> sp.)	25
Tabla 3. Condiciones usadas para el análisis de las propiedades dependiendo de su referencia	29
Tabla 4. pH, contenido de humedad y sólidos totales (ST) en los residuos de fique	31
Tabla 5. Composición mineralógica y proteínas del fique	33
Tabla 6. Composición de celulosa, hemicelulosa y lignina del fique	34
Tabla 7. Concentración de azúcares	35
Tabla 8. Matriz de comparación de condiciones necesarias para el pretratamiento de biomasa lignocelulósicas	41
Tabla 9. Matriz de comparación de recuperación de azúcares e hidrólisis de polisacáridos	43
Tabla 10. Niveles de calificación para la matriz de comparación y selección de microorganismos productores de sorbitol	47
Tabla 11. Matriz de comparación y selección de microorganismos productores de sorbitol	49
Tabla 12. Variables manipuladas por equipo	63
Tabla 13. Costo de equipos y maquinaria	67
Tabla 14. Horas extras y recargos	69
Tabla 15. Costos salariales de la mano de obra directa	69
Tabla 16. Costos salariales de la mano de obra indirecta	71
Tabla 17. Costos de materias primas e insumos	73

LISTA DE ABREVIATURAS

HClO₄	Ácido perclórico
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
ARL	Administradora de Riesgos Laborales
ASTM	American Society for Testing and Materials
NH₃	Amoniac
NH₄⁺	Amonio
BFD	Block Flow Diagram
CaCl₂	Cloruro de calcio
NaCl	Cloruro de sodio
CST	Código Sustantivo del Trabajo
mg / L	Concentración en miligramo por litro
g / L	Concentración gramo por litro
μ	Constante de tasa de crecimiento microbiano
HPLC	Cromatografía líquida de alta resolución
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
SO₂	Dióxido de azufre
NO₂⁻	Dióxido de nitrógeno
USD	Dólar americano
C6105	Enzima celobiosa
GFOR	Enzima Glucosa – Fructosa Oxidorreductasa
KH₂PO₄	Fosfato mono potásico
g / Kg ST	Gramo por kilogramo de sólidos totales
KOH	Hidróxido de potasio

NaOH	Hidróxido de sodio
HMF	Hidroximetilfurfural
Fe	Hierro
IBC	Ingreso Base de Cotización
Mn	Manganeso
<i>E. coli</i>	Microorganismo <i>Escherichia coli</i>
<i>Z. mobilis</i>	Microorganismo <i>Zymomonas mobilis</i>
M USD	Millones de dólares americanos
Mo	Molibdeno
NADH	Nicotinamida adenina dinucleótido
NADPH	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
NO₃⁻	Nitrato
N	Nitrógeno
O₂	Oxígeno
H₂O₂	Peróxido de hidrógeno
F.	Planta del género <i>Furcraea</i>
%	Porcentaje
% P / P	Porcentaje peso a peso
Bar	Presión en bares
Psi	Presión en libras sobre pulgada cuadrada
MPa	Presión en mega pascales
PFD	Process Flow Diagram
PIB	Producto Interno Bruto
CSTR	Reactor de tanque agitado continuo
1:1 v:v	Relación uno a uno de volumen a volumen

ST	Sólidos totales
S6PDH	Sorbitol-6-fosfato deshidrogenasa
SrID1	Sorbitol-6-fosfato 1-deshidrogenasa
SrID2	Sorbitol-6-fosfato 2-deshidrogenasa
(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio
MgSO₄	Sulfato de magnesio
°C	Temperatura en grados Celsius
OECD	The Observatory of Economic Complexity
h	Tiempo en horas
min	Tiempo en minutos
s	Tiempo en segundos
Ton / año	Unidad de flujo másico en toneladas por año
μm	Unidad de longitud en micrómetros
Kg	Unidad másica en kilogramos
Ton	Unidad másica en toneladas
VPN	Valor Presente Neto
L	Volumen en litros
mL	Volumen en mililitros
ZM1	<i>Zymomonas mobilis</i> ATCC 10988
ZM4	<i>Zymomonas mobilis</i> ATCC 31821

RESUMEN

En este trabajo de grado se mostrarán los pretratamientos que se le deben realizar a los residuos de fique, siendo el adecuado la explosión de vapor con ácido sulfúrico diluido, el cual será retirado en forma de sal implementando una neutralización. Posteriormente serán sometidos a un estudio fisicoquímico a modo de revisión bibliográfica donde se evaluará su viabilidad como sustrato para la producción de sorbitol por ruta biotecnológica, obteniendo como resultado un porcentaje de sólidos totales de 19,32 % P/P para el bagazo de fique, el jugo tiene un promedio de azúcares reductores en glucosa de 12,37 g/L, sacarosa de 4,98 g/L y fructosa de 18,02 g/L, con un pH promedio para los residuos de 4,33. Con el objetivo de generar un aprovechamiento de estos residuos se debe tener en cuenta que en los pretratamientos no se pierdan los azúcares fermentables. Con los anteriores aspectos se diseñará conceptualmente una planta de producción de sorbitol usando como microorganismo productor de este metabolito la *Z. mobilis*, al mismo tiempo se evaluarán los costos involucrados, obteniendo de esta forma una inversión aproximada de USD \$285.705 para la mano de obra directa y una correspondiente a USD \$110.826 para la mano de obra indirecta.

Palabras claves: Fique, Sorbitol, Ruta biotecnológica, Explosión de vapor, Azúcares fermentables.

INTRODUCCIÓN

Los agricultores del departamento de Santander, específicamente los pertenecientes a la provincia Guanentá o Guanentina, son los encargados de hacer la primera manipulación de la planta de fique; la cual se caracteriza por ser el cultivo, corte, despalmado y desfibrado de la penca. Al terminar la etapa de desfibrado se obtiene una fibra larga que corresponde al 4% de la penca, y un desperdicio que permanece en el suelo equivalente al porcentaje restante de la penca, debido a que los agricultores no poseen los conocimientos y la tecnología necesaria para aprovechar estos residuos. Se debe tener en cuenta que “Los desechos correspondientes al 96% de la penca, producto del proceso de desfibrado causan un deterioro de la capa vegetativa del suelo y pueden causar contaminación de efluentes cercanos por corrientes de lluvia pasantes.”. [1] De acuerdo a esto, en los documentos *Guía ambiental del subsector fiquero* [2] y en el artículo *Optimización de los subproductos del fique* [1] se hace referencia a su uso como: abono, jabón, energía, compostaje, alimento para animales, etc.

La producción agrícola de fibra de fique en Colombia es de aproximadamente 30.000 toneladas al año [3], esto se consideraría el 4% de fibra proveniente del proceso de desfibrado y unas 720.000 toneladas anuales correspondiente al 96% de residuos de este mismo proceso; convirtiéndose en una fuente potencial y útil para ser aprovechado en otros procesos como lo es la producción de sorbitol.

En vista de que la disponibilidad de este residuo es moderadamente alta y las tecnologías usadas para la producción de sorbitol son a través de la ruta o método químico y biotecnológico, dicho lo anterior se destaca la última por reducción de costos y efectos dañinos sobre el medio ambiente. Esta se enfoca en el consumo de azúcares o sustrato por parte de unos microorganismos productores del metabolito de interés.

A si mismo se da paso a la importancia de la producción de sorbitol, debido a la creciente preocupación por la salud en casi todo el mundo ocasionado por los trastornos alimentarios y enfermedades como la obesidad, la hipertensión y la diabetes, que siguen siendo importantes problemas de salud pública, causados principalmente por una mala alimentación. Por esta razón, la demanda de productos con bajo contenido de azúcar como polialcoholes aumenta cada año.

Razones por las cuales se llevará a cabo el presente proyecto, buscando las condiciones necesarias de los residuos de fique para que puedan ser integrados como materia prima en el proceso productivo del sorbitol, al hacer esto se reduciría la cantidad de material que se deposita en suelos y/o fuentes hídricas y por ende el impacto negativo en el ambiente. Además, con el uso de un microorganismo metabólicamente activo para la producción del sorbitol se aprovecharán los nutrientes de los residuos, y disminuirían los costos por condiciones de operación necesarias para su desarrollo eficiente, comparados con los costos que tienen estos factores en la ruta química.

La metodología se basa en una revisión bibliográfica en diferentes bases de datos para recolectar la información necesaria para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados en el proyecto, es decir, para la caracterización fisicoquímica del fique, la selección del pretratamiento. Para dar seguimiento al diseño conceptual de la planta y los costos respectivos se usarán los diagramas BFD y PFD para describir el proceso con los costos fijos y variables implicados.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el uso de los residuos de fique provenientes del proceso de desfibrado, como sustrato para la producción de Sorbitol.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos del desfibrado de fique.
- Seleccionar los tratamientos previos de adecuación del sustrato para el proceso microbiológico y su transformación en sorbitol.
- Realizar el diseño conceptual de una planta de producción de Sorbitol.
- Analizar los costos involucrados en el diseño conceptual de una planta de producción de Sorbitol.

1. MARCO TEÓRICO

Cada componente involucrado en la materia prima es importante, ya que estas propiedades fisicoquímicas nos permiten determinar la viabilidad de la transformación de este residuo a sorbitol, por medio de un microorganismo. En este capítulo se dan a conocer conceptos que se deben tener en cuenta para llevar a cabo el proceso de obtención de este metabolito, como es el caso de la materia prima, los tratamientos para su transformación, el fique y sus especies, entre otros.

1.1 Sorbitol

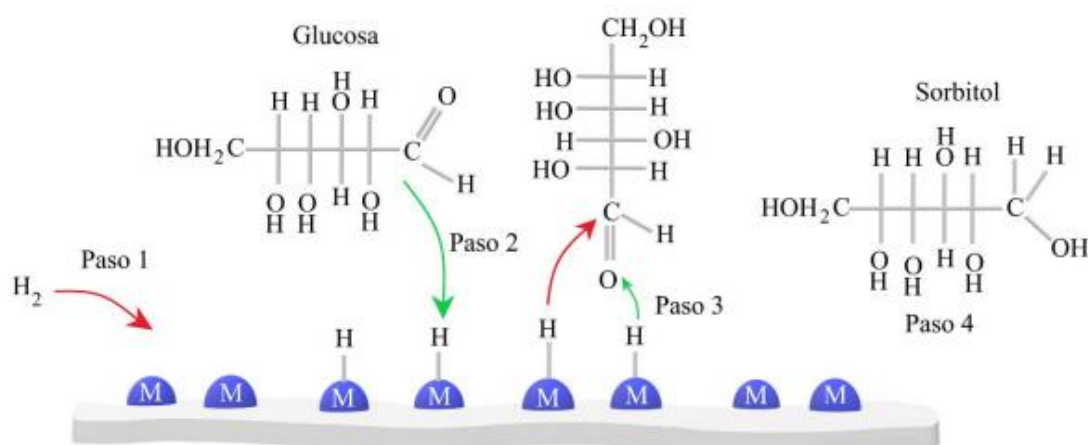
El sorbitol es un alcohol de azúcar de seis carbonos y se usa ampliamente en productos alimenticios y en la industria química específicamente, como fuente de alcohol, producción de resinas, emulsiones en repostería, producción de cosméticos y demás, debido a su dulzor relativamente bajo y alta solubilidad. [4] La producción de sorbitol se puede dar de dos formas, de forma química y de forma biotecnológica, los estudios previos sobre esta última técnica emplearon ampliamente *Z. mobilis*, que puede convertir la fructosa junto a la glucosa en sorbitol a través de la glucosa-fructosa oxidoreductasa (GFOR), debido a que ofrece el potencial para la producción biotecnológica industrial de sorbitol. [5]

1.1.1 Ruta química

“La glucosa experimenta una reacción de reducción del grupo carbonilo presente en su estructura, con la adición de átomos de hidrógeno y la consecuente formación del sorbitol. Esta reacción es preferentemente realizada con catalizadores heterogéneos, ya que presentan estabilidad y esto permite su recirculación en el proceso.” [6]. En el siguiente esquema se presenta el mecanismo de reacción de hidrogenación catalítica que es la utilizada industrialmente.

Figura 1.

Mecanismo de reacción de la glucosa en sorbitol



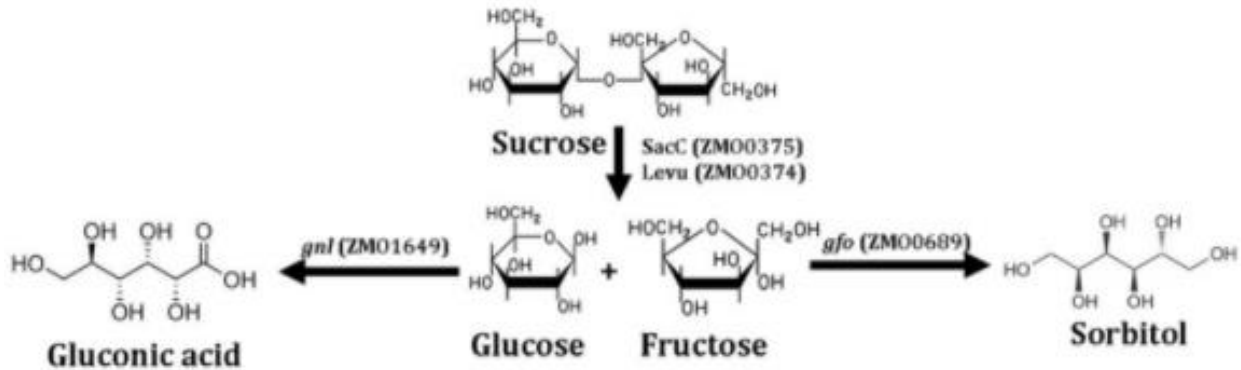
Nota. Ilustración del mecanismo de reacción para la producción de sorbitol de forma convencional por hidrogenación catalítica. Tomado de J. G. A. B. Silva, R. de S. Bispo, A. D. da S. Ruy, Y. Delgado-Arcano, and L. A. M. Pontes, “Economic and technological aspects of chemical sorbitol production/Aspectos económicos y tecnológicos de la producción de sorbitol por vía química,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 31, no. November, p. 23, 2019.

1.1.2 Ruta biotecnológica

El sorbitol también puede ser producido a partir de microorganismos aprovechando biomasa lignocelulósicas como sustrato para crecer, como lo es el caso de *Lactobacillus plantarum* [7] y *Zymomonas mobilis* [8] por ejemplo en este último artículo se menciona que la bacteria *Z. mobilis* puede producir sorbitol por medio de su propia enzima Glucosa-Fruktosa Oxidoreductasa (GFOR) como se muestra a continuación:

Figura 2.

Mecanismo de reacción de sorbitol por la enzima GFOR de Z. mobilis



Nota. Representación del mecanismo de reacción para obtención de sorbitol y ácido glucónico partiendo de sacarosa. Tomado de M. X. He *et al.*, “Zymomonas mobilis: A novel platform for future biorefineries,” *Biotechnol. Biofuels*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2014, DOI: 10.1186/1754-6834-7-101.

Así mismo de acuerdo a M. De Barros y M. A. P. C. Celligoi, la GFOR se encuentra ubicada en el periplasma de la bacteria lo que le permite acumular el sorbitol para prevenir los efectos de alta presión osmótica al crecer en medios con altas concentraciones de azúcares. [9]

1.2 Biomasa lignocelulósica

El componente principal de la mayor parte de la biomasa es la pared celular vegetal. Los componentes principales de la pared celular vegetal son celulosa, hemicelulosa y lignina, en los que la celulosa y la hemicelulosa se denominan generalmente polisacáridos [10]. Para ser más específicos “la hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (Pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcares” [11].

1.2.1 Proceso de transformación de biomasa lignocelulósicas

Se puede hablar de tres técnicas de transformación de la biomasa lignocelulósica siendo las siguientes: Hidrólisis con ácido concentrado, prehidrólisis e hidrólisis con ácido diluido, y por último la hidrólisis enzimática.

1.2.1.a Hidrólisis con ácido concentrado. Fue una de las primeras técnicas en emplearse dado que son capaces de romper la estructura cristalina de la celulosa, se suele emplear disoluciones de ácidos minerales tales como el sulfúrico, clorhídrico y demás, de alta concentración a temperaturas bajas y cortos tiempos de contacto. A estas condiciones se logra transformar la celulosa y hemicelulosa en sacáridos simples. [12]

1.2.1.b Hidrólisis con ácido diluido. Al utilizarse el ácido diluido se debe trabajar a altas temperaturas para así romper fácilmente la estructura cristalina de la celulosa. Cuando se emplea esta técnica se trata de hidrolizar las porciones de biomasa cuya estructura es amorfa, celulosa y hemicelulosa amorfa. De esta manera los residuos de la hemicelulosa eliminada son más fácilmente digeribles por los animales, presentan un menor consumo de ácido y una velocidad alta de reacción para el proceso enzimático. [12]

1.2.1.c Hidrólisis enzimática. La biomasa se debe pretratar, con el objetivo de favorecer el acceso de las enzimas. Una de las técnicas más empleadas consiste en la prehidrolisis del residuo con un ácido diluido y posteriormente la hidrólisis enzimática. Las condiciones de operación son muy suaves, y por ende no se forman productos de degradación y el proceso de fermentación posterior no está inhibida. [12] De lo dicho anteriormente obtienen azúcares reductores que sirven como fuente de energía y de alimento para el microorganismo.

1.3 Fique

El fique es una planta de altura entre 2 y 7 m, con hojas largas que crecen directamente del tallo.[1] Su género es el de Furcraea y es de la familia Agavaceae como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Clasificación taxonómica del fique

Clasificación taxonómica	
Reino	Vegetal
Phylum	Spermatophyta
Clase	Angiospermae
Subclase	Monocotyledoneae
Orden	Liliflorae
Familia	Agavaceae
Género	Furcraea

Nota. Tabla de clasificación Tomado de Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, 2^{da} ed, Cadena Productiva Nacional del Fique - Cadefique, Colombia, 2006, pp 122. [En línea].

En la tabla 1 se encuentra la clasificación taxonómica de la planta de fique. Datos que nos permiten identificar principalmente que el género de la planta es el *Furcraea* y que su familia es el *Agavaceae*, lo que nos ofrece un panorama específico sobre la clasificación de las especies que serán encontradas en los cultivos de fique en Colombia.

1.3.1 Especies de fique

Dentro del departamento de Santander en Colombia, se cultiva básicamente en los municipios de Onzaga, San Joaquín, Mogotes, Curití y Aratoca, sin embargo, existe algunas fincas productoras en los municipios de San Gil, Valle de San José, Páramo, Cépita y Molagavita, los cuales su producción no es muy representativa en relación a la producción departamental. [13]

1.3.1.a Uña de águila (*Furcraea macrophylla*). «Comúnmente conocida como uña de águila, fique macho, Cabuya y Maguey. Sus hojas son de color claro por encima y ceniza por debajo; se distingue por sus espinas encorvadas en sus bordes y un aguijón pequeño en las puntas. Además, emite hijuelos en el tronco.

Esta especie, prefiere los suelos secos y crece bien en los climas medios cafeteros. Es de larga vida productiva. Susceptible a la gotera, macana, estrella y a la adormidera. El largo de la hoja es

de 1.50 m a 2.00 m, con un ancho entre 8 cm y 14 cm y un contenido de fibra entre 4.5% a 8%, dependiendo la calidad del suelo.» [13]

Figura 3.

Uña de Águila



Nota. Se presenta la especie Uña de Águila cultivada en Colombia. Tomado de: Fenalfique, "Cartilla Técnica del Cultivo de Fique" Colombia, 2019. [PDF].

1.3.1.b Ceniza (*Furcraea cabuya* trel). «Comúnmente conocida como Cabuya hembra, Perolero, Cabuya sin espina, que liso o negro. Sus hojas carecen de espinas y son de color verde por encima y grasoso por debajo.

Se cultiva principalmente entre los 1.500 y 2.000 metros sobre el nivel del mar. Se reproduce por hijuelos y bulbillos. Tolerante a la macana y a la gotera, pero muy susceptible al gusano pasador.»[13]

Figura 4.

Ceniza



Nota. Se presenta la especie Ceniza cultivada en Colombia. Tomado de: Fenalfique, "Cartilla Técnica del Cultivo de Fique" Colombia, 2019. [PDF].

1.3.1.c Tunosa común (*Furcraea gigantea*). «Comúnmente conocida como Fique Espinoso. Sus hojas son de color verde brillante por ambos lados y tiene espinas de color café en sus bordes. Es de larga vida útil. No es la más aconsejable para hacer plantaciones extensas. Es susceptible al gusano pasador y a la viruela, es resistente a la gotera. El largo de la hoja es de 1.5 m. a 2.5 m, con un ancho de 15cm a 20 cm, el contenido de fibra es del 2% al 4%; dependiendo la calidad del terreno.» [13]

Figura 5.

Tunosa Común



Nota. Se presenta la especie Tunosa Común. cultivada en Colombia. Tomado de: Fenalfique, "Cartilla Técnica del Cultivo de Fique" Colombia, 2019. [PDF].

1.4 Desfibrado de fique

La actividad del desfibrado es el paso en el cual se separa la corteza de la hoja con la fibra y demás componentes. Este método se hace manualmente o con máquinas con motor de gasolina o diésel. El motor da vueltas a un molino de cuchillas que raspan la penca hasta separar la fibra larga de los demás componentes. [1]

Tabla 2.

Estructura física de la hoja de fique (Furcraea sp.)

Componente	Porcentaje en la hoja	Porcentaje útil	Usos
Fibra	5	4	En la industria textil, empaques
Jugo	70	40	Extracción de esteroides
Estopa	8	3	Pulpa de papel
Bagazo	17	10	Material de construcción, abonos

Nota. Se muestra la estructura física de la hoja de fique, con su porcentaje útil para las diferentes industrias. Tomada de Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, 2^{da} ed, Cadena Productiva Nacional del Fique - Cadefique, Colombia, 2006, pp 122. [En línea].

El conocer la estructura física de la hoja de fique permite determinar qué porcentaje de esta puede ser utilizada como sustrato para la producción de sorbitol. Además de tener certeza de la cantidad o porcentaje del residuo que es lo suficientemente adecuado para la producción de sorbitol.

1.5 Saponinas

Son compuestos que están presentes en gran parte del reino vegetal. Estos glucósidos realizan importantes funciones fisiológicas en las plantas. su diversidad estructural abre campo a diversas propiedades fisicoquímicas y biológicas como es la formación de espumas, emulsificación, solubilización, hemolíticas, antimicrobianas, insecticidas y demás, propiedades que son utilizadas en diversas industrias alimentarias, cosmética y farmacéutica. [14] Las saponinas son anfipáticas y a su vez hidrosolubles, característica que es la base de su capacidad para formar espuma. [15]

El jugo de fique tiene 8% parte orgánica y amorfa dentro de las cuales se encuentran las saponinas. [2] Estas se han caracterizado por su actividad biológica como antimicrobiano. [16] Pero según L. Castro, C. Guzmán, y H. Escalante se ha estudiado que lo anterior depende de la planta de la cual proviene la saponina y su concentración, debido a que para el fique se ha demostrado que no inhiben el crecimiento y desarrollo de las bacterias hidrolíticas, en lugar de esto se activa la capacidad hidrolítica del inóculo incrementando rendimientos. [17] Presentándose una situación

similar como ocurre con el sisal; que es una planta de la misma familia que el fique que no tiene actividad antimicrobiana. [14]

1.6 Biorreactores de lecho fijo

“El desarrollo de técnicas de inmovilización de microorganismos en matrices (por atrapamiento) o sobre soportes (por adhesión) ha permitido la puesta en operación de reactores de lecho fijo. Estos equipos permiten alcanzar unas elevadas productividades y una gran estabilidad de operación” [18].

Además, de acuerdo a lo mencionado por J. M. Rumaldo Torres se descarta el uso de otro tipo de biorreactores como lo es el de tanque agitado por que causa daño (en algunos casos) a las células que pasan a través de la zona de grandes esfuerzos de corte cercana al impulsor. [18]

1.7 Fermentación

La fermentación de los azúcares presentes en los residuos de fique por medio de microorganismos permite la posterior obtención del sorbitol que es el metabolito de interés a producir. Para esta fermentación se definen 2 tipos adicionales que se pueden usar en el biorreactor de lecho fijo para el proceso.

1.7.1 Fermentación sumergida discontinua

Es el método de producción más sencillo, ya que sólo se tiene que poner el medio de cultivo con los sustratos necesarios para el crecimiento de biomasa y/o producto, además de controlar las variables del proceso en las condiciones óptimas para la fermentación. En esta a lo largo de toda la fermentación no se añade nada. [18]

1.7.2 Fermentación sumergida continua

J. M. Rumaldo Torres menciona como la solución nutritiva estéril se añade continuamente al biorreactor y una cantidad equivalente de solución utilizada de los nutrientes, con los microorganismos, se saca simultáneamente del sistema. El propósito de esta es mantener constante la producción de biomasa, pero a nivel industrial es complicado mantener este tipo de procesos

continuos por las condiciones requeridas durante la fermentación, la esterilidad y los cambios de composición de los nutrientes. [18]

2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS RESIDUOS DE FIQUE

Inicialmente se hará la caracterización de los residuos del fique, teniendo en cuenta la zona objetivo de nuestro estudio, tomando como muestras las principales especies cultivadas en fincas dentro de la provincia guanentina de Santander, Colombia, lo cual permitirá tener un mayor panorama con respecto a la composición fisicoquímica de esta materia prima para nuestro proyecto. Esto debido a que el tratamiento del cultivo puede diferir de una finca a otra afectando los resultados y conclusiones del proyecto. [2] Además de variar la especie cultivada en cada caso, en donde las 2 principales encontradas son Uña de águila (*Furcraea macrophylla*) y la Tunosa común (*Furcraea gigantea*).

A continuación, en la tabla se resumen las condiciones y demás aspectos que se usaron para el análisis de cada una de las propiedades tomadas de otra bibliografía referenciada en este documento. Estas propiedades son: pH, humedad, sólidos totales, composición mineralógica y proteínas, contenido de lignina, hemicelulosa, celulosa y azúcares.

Tabla 3.*Condiciones usadas para el análisis de las propiedades dependiendo de su referencia*

Cita	Descripción
[19]	El bagazo de fique se toma del departamento de Santander en Colombia. y su caracterización se hizo de acuerdo con los procedimientos establecidos por Van Soest [20] y los Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales [21].
[22]	Usaron siete residuos distintos dentro de los cuales está el fique de cultivos ubicados en Santander, Colombia. Las muestras antes de la caracterización fisicoquímica se secaron, molieron y tamizaron a través de tamices con un tamaño de malla de 250 a 450 μm . Los sólidos totales y los sólidos volátiles se determinaron con base en un análisis termogravimétrico de acuerdo con la norma ASTM D7582-10.
[23]	La caracterización de la planta de fique <i>furcraea</i> sp está enfocada en los principales departamentos productores del país que son Cauca, Nariño, Antioquia, Santander y Boyacá
[24]	El jugo de la planta de fique <i>furcraea</i> sp se obtuvo de la Vereda El Pantanillo Del Municipio de Barbosa, Antioquia. Se transportó en recipientes plásticos expandibles refrigerados y se conservó en el mismo recipiente a -18°C durante un tiempo máximo de 8 días. Usaron métodos normalizados [21], [25].
[17]	Los datos usados de esta referencia se basaron a su vez en un documento que es de Ecuador, con la planta de fique <i>furcraea</i> sp abarcando las especies <i>F. macrophylla</i> , <i>F. cabuya</i> , <i>F. andina</i> .
[26]	El bagazo de fique que se utilizó se recolectó en una planta de beneficio ubicada en Mogotes - Santander. Las muestras se conservaron refrigeradas para su posterior caracterización.
[3]	Se tomaron muestras de fibras, estopa y pulpa de fique de cultivos en la zona rural de San Joaquín, Santander, Colombia. Se almacenaron a baja temperatura, se filtraron y lavaron con agua destilada para eliminar los residuos de jugo de fique que quedaron después del proceso de desfibrado. Los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina se determinaron según el método de Kurschner y Hoffer, el método de clorita de Jayme-Wise y el método de Klason respectivamente.
[27]	Se utilizó fique de la variedad Negra Común (<i>Furcraea gigantea</i> Vent.) procedentes del Municipio de El Tambo (Nariño). El jugo se extrajo mediante un molino de rodillos, se conservó a una temperatura de -10°C . Sin embargo, no se conoce la caracterización fisicoquímica del jugo de fique de la variedad Negra Común, por lo que se tomó como aproximación la caracterización del jugo de fique de la variedad Uña de Águila

Nota. En la anterior tabla se reúnen diferentes referencias en las que se encuentra información como lugar del que se extrajo el fique para su análisis, almacenamiento y métodos usados para la caracterización de los residuos.

De acuerdo a la tabla anterior se puede definir que después de extraídos los residuos de fique estos deben ser conservados a una temperatura inferior a -10°C con el fin de evitar su deterioro, y que a

pesar de que no se posean datos específicos sobre una especie estos se pueden tomar como aproximados de otra especie de la cual si se tiene disponible dicha información.

2.1 pH, Humedad, sólidos totales

Según el libro de Brock hay 4 factores que tienen una función destacada en el control del crecimiento microbiano: la temperatura, el pH, la disponibilidad de agua y el oxígeno. [28] Para este caso es de gran importancia medir el pH de los residuos debido a que al entrar en contacto con este cada microorganismo es diferente y puede verse afectado por esta variación, teniendo cada uno un rango óptimo dentro del cual presenta un mayor crecimiento.

Por otro lado, N. Barros, I. Gomez-Orellana, S. Feijóo, y R. Balsa reportaron que la constante de tasa de crecimiento microbiano (μ) y el número de microorganismos también disminuyeron con la disminución del contenido de humedad. [29] De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la humedad contribuye de forma directamente proporcional al aumento o disminución en la presencia de microorganismos.

Además, se debe tener en cuenta que la cantidad de sólidos totales (ST) presentes en los residuos, disminuyen la conversión del producto a medida que aumentan. Se sugirió que un alto contenido de ST podría reducir la degradación del sustrato. [30] Por otro lado, interfieren con la cuantificación de la biomasa microbiana cuando se desarrolla la fermentación, impidiendo la medición de ésta. [24]

Tabla 4.*pH, contenido de humedad y sólidos totales (ST) en los residuos de fique*

Material	Parámetro	Unidades	Valor	Referencia
Bagazo de fique	pH		4	[19]
	Sólidos Totales (ST)	% P/P	14,64	[22]
		% P/P	24	[19]
	Humedad	%	85,36	[22]
Jugo de fique	pH		4 - 5	[23]
			4,25	[24]
	Humedad	%	85	[2]
			91,05	[24]
	Sólidos Totales (ST)	g / L	68,8	[24]

Nota. En la anterior tabla se reúnen diferentes referencias en las que se encuentran las propiedades de pH, contenido de humedad y sólidos totales (ST) en los residuos de fique. Tomados de varias fuentes de información referenciadas.

A partir de la tabla 4 se analiza que de forma general los residuos provenientes del proceso de desfibrado tendrán un pH en un rango entre 4 a 5 por lo que lo más recomendable es seleccionar un microorganismo que crezca en un pH similar a éste. De igual manera la humedad de este residuo es alta considerando que el máximo es el 100%, por lo tanto, aumentará la presencia de los microorganismos beneficiando el proceso como ya se explicó anteriormente. Por último, la cantidad de sólidos totales presentes en estos residuos es relativamente baja siendo bueno para la conversión del producto, y en base a los ST del bagazo de fique se puede pensar que habrá una interferencia en cuantificación de biomasa del 15 al 24% aproximadamente.

2.2 Composición mineralógica y proteínas

Una de las razones para la determinación de nitrógeno es su importancia para el sustento de las diferentes formas de vida, encontrándose en las plantas en formas orgánicas e inorgánicas. Pero estas se encuentran en menor medida, estando en mayor parte como NO_3^- , puesto que es la única forma inorgánica capaz de ser almacenada. Por tal razón, el nitrógeno se encuentra dentro de la planta en forma orgánica. Adicional a lo anterior, existe la inmovilización de nitrógeno (N) que “Es la transformación de N inorgánico (NH_4^+ , NO_2^- o NO_3^-) del suelo en N orgánico, realizada por los microorganismos cuando absorben N mineral y lo transforman en el N constituyente de sus células y tejidos, esencial en varios procesos metabólicos” [31].

Cuando hablamos de proteínas debemos tener en cuenta el proceso de hidrólisis, donde la materia orgánica contiene moléculas complejas que deben ser degradadas a compuestos más simples, moléculas que puedan ser metabolizadas por los microorganismos. En este proceso los microorganismos actúan sobre las proteínas; transformándose por hidrólisis en compuestos orgánicos solubles. De esta manera, las proteínas se hidrolizan hasta péptidos y aminoácidos. [19]

El sustrato usado en este caso los residuos del fique, además de nitrógeno deben tener unos minerales o elementos esenciales para el desarrollo del microorganismo. “Las funciones de cada uno varían desde servir en funciones de coenzimas hasta catalizar muchas reacciones, síntesis de vitaminas y transporte de la pared celular. Los requisitos se encuentran generalmente en niveles muy bajos y todos los elementos metálicos necesarios se pueden suministrar como nutrientes en forma de cationes de sales inorgánicas” [32].

Tabla 5.*Composición mineralógica y proteínas del fique*

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
Bagazo de Fique			
Proteínas	5,84 - 43,8	% P/P – $g Kg^{-1} ST$	
Carbono	35,58	% P/P	
Hidrógeno	6,02	% P/P	
Oxígeno	47,44	% P/P	
Nitrógeno	1,32	% P/P	
Sulfuros	0,006	% P/P	[17], [26]
Calcio	21,65	% P/P	
Fósforo	0,09	% P/P	
Magnesio	0,20	% P/P	
Potasio	1,81	% P/P	
Sodio	0,04	% P/P	
Jugo de fique			
Calcio	1,226	mg / L	
Magnesio	141	mg / L	[24]
Zinc	1	mg / L	
Hierro	10	mg / L	

Nota. Los datos de composición mineralógica y proteína para la tabla anterior fueron tomados de varias fuentes de información.

De acuerdo a la tabla 5 se observa que los residuos de fique poseen variedad de minerales como lo son el calcio, magnesio y potasio, además de un contenido de nitrógeno y proteínas que permite

convertir estos residuos en una fuente potencial de sustrato para ser consumida por un microorganismo.

2.3 Determinación de lignina, hemicelulosa y celulosa

La lignina, celulosa y hemicelulosa son los biopolímeros más abundantes en las plantas, estos polímeros tienen gran relevancia para el documento. Importancia que se ve reflejada en la composición de la celulosa que contiene subunidades de D-glucosa, la hemicelulosa que tiene una estructura de carbohidratos con diferentes azúcares como las pentosas, hexosas y ácidos de azúcares, y finalmente la lignina que tiene como función dar soporte estructural, impermeabilidad y resistencia contra los microorganismos. [11]

Para el aprovechamiento de los residuos de fique es indispensable el pretratamiento, ya que como mencionan A. Sánchez, A. Gutiérrez, J. Muñoz, y C. Rivera esta etapa complementa la hidrólisis enzimática y aumenta las posibilidades de altos rendimientos. Son necesarios porque la lignina en las paredes de la planta forma barreras de protección contra el ataque enzimático. Un pretratamiento necesario es la eliminación del contenido de lignina, también disminuir la cristalinidad de la celulosa y finalmente incrementar el área superficial. [33] Lo anterior con el fin de acceder a los azúcares necesarios para el crecimiento del microorganismo y su transformación para obtener el metabolito de interés del proyecto.

Tabla 6.

Composición de celulosa, hemicelulosa y lignina del fique

Material	% Composición			Referencia
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	
Bagazo de fique	41,8	22,2	15,6	[19]
	52,43	27,80	19,76	[22]
Pulpa de fique	30,5 ± 1,1	29,7 ± 1,3	9,6 ± 2,4	[3]
Estopa de fique	52,3 ± 3,0	23,8 ± 6,2	23,9 ± 7,6	

Nota: Los datos de composición anterior se obtuvieron de 2 fuentes de información.

Se puede decir que los residuos de fique tienen un alto contenido de celulosa especialmente el bagazo de fique lo cual es importante porque por medio de una hidrólisis es finalmente de dónde provendrán los azúcares fermentables que consumirá el microorganismo productor de sorbitol y a su vez tienen un contenido bajo de lignina que favorece el pretratamiento debido a que será menos lignina la que deberá ser tratada.

2.4 Determinación de azúcares

Un suministro adecuado de carbono es vital para el crecimiento microbiano y la formación de productos. “Las fuentes de carbono definidas incluyen azúcares simples como glucosa, fructosa, manosa, galactosa, sacarosa y xilosa; polisacáridos como almidón; y lípidos que incluyen oleatos y glicéridos. La glucosa y la sacarosa son dos de las fuentes de carbono más comúnmente utilizadas en la fermentación debido a la capacidad de una gran variedad de microorganismos para utilizar estos azúcares” [34]. Por esta razón se analizan los azúcares presentes en los residuos de fique para ser aprovechados por el microorganismo como principal fuente de carbono.

Tabla 7.

Concentración de azúcares

Material	Unidades (g / L)			
	Glucosa	Sacarosa	Fructosa	Referencia
Jugo de fique	11,22	0,24	7,3	[27]
	13,51	9,71	28,74	[24]

Nota. Concentración de 3 azúcares encontrados en el jugo de fique tomados de 2 referencias distintas.

De acuerdo a la tabla anterior y promediando, el principal azúcar presente en este residuo es la fructosa seguido por la glucosa y finalmente la sacarosa. Esto es importante debido a que se pueden usar microorganismos que consumen glucosa o cualquiera de estos azúcares para obtener el sorbitol.

Al tener las propiedades fisicoquímicas ya definidas y los porcentajes de participación de cada una dentro de los residuos de fique, podemos dar paso al proceso biotecnológico, donde se seleccionará el pretratamiento adecuado para la eliminación de la lignina y la conversión de la celulosa en azúcares fermentables. Así mismo, se podrá realizar una comparación y selección del microorganismo que procederá en la transformación de la fructosa en sorbitol.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO BIOTECNOLÓGICO

Cuando se habla del proceso biotecnológico se hace referencia al empleo de organismos vivos para la obtención de Sorbitol. Asimismo, se dedica a la mejora de los procesos industriales, buscando cambiar las tecnologías contaminantes por otras que sean más limpias con el medio ambiente. Simultáneamente es importante resaltar que la biotecnología en la industria proporciona nuevos productos que jamás se habían tomado anteriormente. Por esta razón a continuación se analizarán los pretratamientos a los que deben ser sometidos los residuos de fique para su transformación en sorbitol y de igual forma los microorganismos que permiten esta transformación.

3.1 Pretratamiento de deslignificación de los residuos de fique

El pretratamiento es un factor determinante para la eliminación principalmente de lignina y un poco de hemicelulosa para dar paso a la conversión de la biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables, pero este proceso está limitado debido a factores como la cristalinidad de la celulosa, el grado de polimerización, el contenido de humedad, la superficie disponible y el contenido de lignina.

En la actualidad se han utilizado una gran variedad de métodos para realizar el pretratamiento de estas materias lignocelulósicas, por ende, para el proyecto se explicará cada uno y se realizará una tabla de comparación de condiciones necesarias para el pretratamiento, con el objetivo de elegir el más adecuado.

3.1.1 Explosión de vapor

Según S. G. Karp, A. L. Woiciechowski, V. T. Soccol, y C. R. Soccol este método es de los más utilizados, donde la biomasa previamente triturada se somete a vapor saturado a presión y temperatura alta, y luego la presión se reduce rápidamente, haciendo que el material sufra un proceso de descompresión explosiva. Este proceso es conocido por provocar alteraciones en la estructura de la materia prima, la degradación de la hemicelulosa y la transformación de la lignina, facilitando el proceso posterior de hidrólisis de la celulosa, todo lo anterior se puede realizar con presencia de catalizadores o con ausencia de estos. [35]

Cuando no añadimos catalizador a la explosión de vapor tenemos un proceso llamado autohidrólisis del sustrato lignocelulósico. Donde las condiciones ácidas, se resaltan los ácidos

grasos de la biomasa, donde el ácido acético es liberado por las hemicelulosas acetiladas y es utilizado como catalizador para posteriores hidrólisis y degradación de glucosa y xilosa. El proceso asegura la utilización del sustrato basado en la recuperación de la celulosa, la recuperación de azúcares y una baja formación de degradación como describen A. Duque, P. Manzanares, I. Ballesteros, y M. Ballesteros. [36]

3.1.2 Pretratamiento alcalino

En base a lo reportado por S. G. Karp, A. L. Woiciechowski, V. T. Soccol, y C. R. Soccol este pretratamiento se ha utilizado debido a su capacidad para eliminar la lignina de las biomásas, y de esta manera mejorar la reactividad de los polisacáridos residuales. También se caracteriza por causar una hinchazón, generando una disminución en el grado de polimerización, la cristalinidad y carbohidratos. Normalmente se efectúa después de someter la materia prima a explosión por vapor y a una alta temperatura. De esta manera se aumenta el nivel de celulosa y disminuyendo el contenido de hemicelulosa. [35]

3.1.3 Pretratamiento Organosolv

Se realiza mediante el uso de disolventes orgánicos y agua, son procesos eficaces en la eliminación de la lignina y dan como resultado una pulpa rica en celulosa. Además S. G. Karp, A. L. Woiciechowski, V. T. Soccol, y C. R. Soccol explican como uno de los factores determinantes en la utilización de esta técnica es la recuperación de la lignina y poliosas mediante destilación con el reciclaje de disolventes. Estudios han demostrado que al combinar un pretratamiento con ácido diluido con el método organosolv es suficiente para dar paso a una hidrólisis enzimática. [35]

3.1.4 Agua caliente líquida

“Método hidrotermal que consiste en aplicar presión al agua a una temperatura elevada, convirtiendo este fluido en una sustancia subcrítica con propiedades fáciles de controlar como funciones de temperatura y presión” [35] El tratamiento es implementado industrialmente por sus altos rendimientos y su baja generación de productos no deseados. [37]

3.1.5 Oxidación húmeda

S. G. Karp, A. L. Woiciechowski, V. T. Soccol, y C. R. Soccol describen que el material se trata con agua y aire u oxígeno a temperaturas altas lo cual da paso a dos tipos de reacciones: una hidrolítica a temperaturas bajas que genera un producto sólido con alto contenido de celulosa, una alta solubilidad de hemicelulosa y una eliminación media de la lignina y una segunda reacción oxidativa a altas temperaturas que da como resultado un buen fraccionamiento del material, pero se pierde una parte significativa de polisacáridos. [35]

3.1.6 Expansión de fibra de amoniaco

“Es un proceso en el que se maneja amoniaco líquido bajo presión moderada y temperaturas altas, antes de generar una liberación de presión, generando una descristalización de la celulosa, se hidroliza la hemicelulosa, se elimina y despolimeriza la lignina y de esta manera aumentando la velocidad de la hidrólisis enzimática” [35].

3.1.7 Explosión húmeda

R. Biswas, H. Uellendahl, y B. K. Ahring abordan esta técnica siendo una de las variaciones de la explosión de vapor. Donde al combinar la hidrólisis térmica, la explosión de vapor y la oxidación húmeda se logra una solubilidad eficaz de la lignina y la hemicelulosa al ser comparada con la explotación de vapor. El proceso se efectúa con un acondicionamiento de la materia prima, manejando condiciones de temperaturas altas, tamaños de partícula y cambios de presión. [38]

«Al agregar un agente oxidante se da paso a la descomposición de la lignina, a la mejora de la disponibilidad de celulosa y hemicelulosa. Se presentan buenos resultados con la presencia de oxígeno al mejorar la conversión de la biomasa lignocelulósica en azúcares efectuando una reacción de naturaleza exotérmica lo cual permite bajar costos en el proceso de calentamiento. El pretratamiento ha tenido una adaptación con una gran variedad de biomasa lignocelulósicas, pero presenta una correlación negativa entre la celulosa y el contenido de lignina en la materia prima.» [36]

3.1.8 Pretratamiento de dos pasos

Este tratamiento como su nombre lo indica se divide en dos partes, un primer paso en la cual se maneja a una menor temperatura donde se puede solubilizar los azúcares hemicelulósicos y un segundo tratamiento para la fracción sólida a temperaturas altas para así hidrolizar la celulosa. Sin embargo, de acuerdo a A. Duque, P. Manzanares, I. Ballesteros, y M. Ballesteros no está claro que sea un proceso económicamente viable, pero si es favorable en rendimientos para la fermentación de glucosa teóricamente después de realizar una hidrólisis y fermentación por separado. [36]

3.1.9 Pretratamiento químico

Este pretratamiento involucra una Pre-deslignificación y una división en dos etapas. Previamente se utiliza una solución de NaOH, una agitación en baño de aceite con un tiempo aproximado de 90 min y una alta temperatura, esto con el objetivo de realizar un blanqueo y el poder romper previamente los enlaces de lignina, hemicelulosa y celulosa. Posteriormente, se lava con agua caliente y se seca por 24 h, y se da paso a la primera etapa, donde se elimina la lignina de la materia prima; se lleva a cabo con ácido peracético y un agitador de agua caliente. Las muestras se someten a lavado y a secado en horno, dando de esta manera paso a la segunda etapa del tratamiento. Las muestras se remojan en ácido sulfúrico, se someten a un agitador de aceite caliente y se secan en un horno para su posterior proceso. [7]

Tabla 8.

Matriz de comparación de condiciones necesarias para el pretratamiento de biomosas lignocelulósicas

Pretratamiento	Parámetro				Referencia
	Tipo de catalizador	Temperatura	Presión	Tiempo	
Explosión de vapor	Álcali o Ácido	160 a 260 °C	0,69 a 4,83 MPa	15 min	[35]
	H ₂ O ₂	80 °C	-	45 min	[39]
Álcali	NaOH	100 °C	-	1 h	[35]
Organosolv	Álcali o Ácido	195 °C	-	1 h	
Agua caliente líquida	Agua	170-230 °C	Superior a 5 MPa	45s a 4 min	
Oxidación húmeda	Agua, Aire u Oxígeno	Superior a 120 °C	-	15 min	
Expansión de fibra de amoníaco	NH ₃	70 a 200 °C	100 a 400 psi	-	
	Álcali	40 a 140 °C	250 a 300 psi	30 min	[36]
Explosión húmeda	O ₂	55 a 110 °C	15 a 35 bar	48 h	
	H ₂ O ₂	140 a 200 °C		5 a 30 min	
	Aire	170 a 210 °C		1 a 30 min	
De dos pasos	SO ₂	190 y 220°C	-	2 y 5 min	
Químico	NaOH H ₂ SO ₄	60 a 123 °C	-	90 min a 24 h	[7]

Nota. Matriz de comparación de nueve pretratamientos posibles para el uso sobre biomosas lignocelulósicas.

Como resultado de la investigación realizada para el pretratamiento de la biomasa, se seleccionó la explosión de vapor con ácido diluido como catalizador, debido a que de acuerdo con la tabla

anterior este no maneja tiempos y temperaturas de operación tan altas, siendo los principales criterios considerados para descartar los otros pretratamientos. Otro factor a tener en cuenta para su elección es el implemento del catalizador ácido, con este el contenido de lignina obtenido de los residuos pretratados es aproximadamente de 20,8 - 28,9%. Por otra parte, en el pretratamiento de los residuos se puede ver que la conversión de glucosa es independiente de la concentración de ácido, alcanzando una conversión máxima de glucosa del 72,5% a una concentración de ácido del 3% para la hidrólisis enzimática posterior. En otras palabras, concentraciones de ácido sulfúrico cada vez más altas durante el pretratamiento conducen a que la biomasa pretratada tenga una mayor hidrofobicidad; esto da como resultado un aumento de la adsorción de la enzima celulosa [40]. Se puede señalar que durante el tratamiento se destruyen parcialmente los enlaces lignina-carbohidrato, y como resultado se obtiene un producto fibroso cuya celulosa es más accesible a la hidrólisis enzimática. Además de tratar un tamaño de partícula considerablemente superior a los utilizados en otros pretratamientos, y de esta manera poder reducir los costos en molienda. De igual forma las variables más importantes en el tratamiento de explosión por vapor son la temperatura, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula y la humedad

3.2 Hidrólisis de los polisacáridos y obtención de azúcares.

La importancia de los polisacáridos o también llamados glucanos se debe a su abundancia en la naturaleza. Siendo macromoléculas utilizadas por los vegetales como material estructural o como almacenamiento de energía. Se pueden encontrar de manera lineal o ramificada, y están constituidos por unidades de monosacáridos unidos con enlaces glucosídicos.

Entre los polisacáridos más destacados tenemos la hemicelulosa, celulosa, almidón, glucógeno y quitina. Dónde la celulosa es el polisacárido con mayor presencia en el planeta, encontrándose en la pared de las células vegetales, participando en la digestión de los seres humanos y la producción de barniz, papel, entre otros. Los polisacáridos se pueden descomponer por medio de hidrólisis que consiste en la interacción entre una molécula de agua y otra, y de esta manera dividir en dos partes la molécula de agua.

Entre los monosacáridos más importantes tenemos la glucosa, la fructosa y la galactosa. Siendo la glucosa la fuente de energía más utilizada de las células. Poseen características cristalizables, sólidos a temperatura ambiente, alta solubilidad y dulces. Químicamente están constituidos por

una sola cadena de polialcoholes con un grupo aldehído o cetonas y por tal razón no pueden descomponerse mediante hidrólisis.

Tabla 9.

Matriz de comparación de recuperación de azúcares e hidrólisis de polisacáridos

Componente de interés	Parámetro			Referencia	
	Componente Extractor	Tratamiento	Forma de Determinación		
Azúcares	Solución Hidroalcohólica Solución de etanol	Baño de ultrasonidos Centrífuga. Filtración.	Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).	[41]	
	Solución de etanol	Ultrasonido Papel filtro		[42]	
	Ácido sulfúrico. Hidróxido de Bario.	Hidrólisis. Esterilización. Neutralización. Filtración.		[43]	
	Citrato de sodio	Agitador. Hidrólisis enzimática.		[39]	
	Tampón acetato	Hidrólisis enzimática. Agitador rotatorio. Centrífuga.		Método mutarotase-GOD. Espectrofotómetro.	[44]
	Pergalase A40 Solución NaOH	Hidrólisis enzimática.		Sistema Dionex LC20.	[45]
Glucosa Fructosa Maltosa Sacarosa	Solución de HClO ₄ KOH	Centrífuga Filtración	Métodos Enzimáticos. HPLC. Cromatografía.	[46]	
Polisacáridos	NaOH Ácido trifluoroacético Argón H ₂ SO ₄	Hidrólisis.	Cromatografía de intercambio aniónico Colorimetría	[47]	
Azúcares Glucosa	Complejo celulolítico. Ácido sulfúrico	Hidrólisis enzimática. Post Hidrólisis	HPLC	[39]	

Nota. Se presenta la matriz de comparación de recuperación de azúcares e hidrólisis de polisacáridos de 9 formas distintas.

Con base a la información condensada en la tabla 9 se decide usar una hidrólisis más específicamente una hidrólisis enzimática el cual usa un complejo celulolítico esto debido a que como se explicó anteriormente los azúcares obtenidos de los polisacáridos no podrán descomponerse por la acción de estas enzimas que es fundamental para que lleguen la mayor cantidad posible de azúcares a la fermentación sin haber pérdidas. Además de que incurre en menos problemáticas ambientales a diferencia de otro tipo de hidrólisis como ocurriría en el caso de un ácido o una base como los que se mencionan en la misma tabla. Adicional al factor ambiental, es importante considerar la parte económica en donde por ejemplo para los ácidos y bases se debe implementar una neutralización de los mismos, trayendo consigo costos por el ingreso de nuevos químicos al proceso, situación que es diferente al de las enzimas para la hidrólisis enzimática en la cual se pueden comprar aisladas directamente de los microorganismos o adquiriendo los microorganismos para hacer desde un comienzo todo el procedimiento de extracción de dichas enzimas, como resultado de emplear la segunda opción se tendrían costos principalmente por equipos usados para la extracción debido a que para la compra del microorganismo solo se necesitaría de una primera y única inversión. Por otro lado, de la tabla 9 también se puede analizar que se usa la técnica de colorimetría que permite ver la presencia de los azúcares y con el HPLC determinar con precisión cuales son y su cantidad.

3.3 Microorganismos productores de sorbitol

Para la producción de sorbitol por medio de la ruta biotecnológica se tienen diferentes microorganismos capaces de lograr la conversión de los azúcares presentes en el medio a este metabolito de interés. En base a esto a través de una matriz comparación y selección de microorganismos productores de sorbitol se analizarán 3 microorganismos con el fin de seleccionar el más adecuado para el proceso teniendo en cuenta 6 parámetros importantes para el proceso que se explicarán a continuación:

3.3.1 Tipo de microorganismo y fuente de energía lumínica

Los microorganismos que pueden ser usados para este caso se clasifican en hongos y bacterias siendo las bacterias las más recomendables debido a su rápido crecimiento en el cultivo siendo de horas, a diferencia de los hongos que puede demorar días a excepción de las levaduras. Además

de esto, hay algunos microorganismos que son fototróficos como las cianobacterias por lo cual requieren de una fuente lumínica para su crecimiento. [28]

3.3.2 Temperatura y pH de crecimiento óptimos

La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan al crecimiento y a la supervivencia de los microorganismos. “Así, para cada microorganismo existe una temperatura mínima por debajo de la cual no es posible el crecimiento, una temperatura óptima a la que se produce el crecimiento más rápido, y una temperatura máxima por encima de la cual no es posible el crecimiento” [28].

«Al igual que la temperatura cada microorganismo tiene un rango de pH dentro del cual es posible el crecimiento y normalmente posee un pH óptimo bien definido. La mayoría crece en un margen de pH de 2-3 unidades. Casi todos los ambientes naturales tienen un valor de pH entre 5 y 9, y los organismos con pH óptimos de este orden son los más comunes. Sólo unas cuantas especies pueden crecer por debajo de 2 o por encima de 10.» [28]

3.3.3 Condiciones necesarias para obtener sorbitol

Los microorganismos al comportarse de formas distintas pueden diferir en la forma como obtienen los metabolitos que son de interés para la industria, por lo cual se debe analizar si el microorganismo deberá ser sometido a condiciones de estrés para que produzca el metabolito o si es necesario modificar una ruta metabólica predeterminada con el fin de obtener el sorbitol.

3.3.4 Necesidad de modificaciones genéticas

Por otro lado, para que ocurra la transformación de los azúcares en el producto que se desea también es necesario tener en cuenta si el microorganismo requiere de modificaciones genéticas o si por el contrario este dispone de lo necesario como es el caso de enzimas para transformar los azúcares del sustrato en sorbitol.

3.3.5 Clasificación del microorganismo de acuerdo a la necesidad de oxígeno

«Los microorganismos son muy variados en cuanto a la necesidad o tolerancia del oxígeno, se pueden dividir en varios grupos dependiendo del efecto del oxígeno. Los aerobios crecen en condiciones de oxígeno normales. Los microaerófilos, son aerobios que pueden usar el oxígeno sólo cuando está presente a niveles más bajos que en el aire. Muchos aerobios son facultativos, lo que significa que en condiciones de cultivo apropiadas pueden crecer tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas.» [28]

“Algunos microorganismos no toleran el O₂ llamados anaerobios. Existen dos clases de anaerobios: los anaerobios aerotolerantes o facultativos, que toleran el oxígeno y crecen en su presencia, aunque no pueden usarlo, y los anaerobios estrictos que son inhibidos o mueren en presencia de oxígeno” [28].

Por otro lado, se puede considerar como recomendable el uso de microorganismos aerobios debido a que son los más comunes en condiciones naturales, después los aerotolerantes o facultativos y por último los anaerobios estrictos ya que suministrar un ambiente completamente libre de oxígeno es complicado y requiere de equipos sofisticados.

Para la evaluación del microorganismo a escoger se establecen 3 niveles de calificación, alto, medio y bajo, para cada aspecto a analizar que se explicó anteriormente clasificados de la siguiente manera:

Tabla 10.

Niveles de calificación para la matriz de comparación y selección de microorganismos productores de sorbitol

NIVEL	MOTIVO	VALOR
ALTO	<p>Tipo de microorganismo: Es una bacteria o levadura.</p> <p>Fuente de energía lumínica: El microorganismo no requiere de una fuente de luz para crecer.</p> <p>Temperatura y pH de crecimiento óptimos: Tiene un rango de operación que puede ser alcanzado más fácilmente teniendo en cuenta las propiedades de los residuos de fique como el pH.</p> <p>Condiciones necesarias para obtener sorbitol: El microorganismo no requiere ser sometido a condiciones específicas por lo que solo debe ser suministrado lo necesario para su crecimiento y producirá sorbitol.</p> <p>Necesidad de modificaciones genéticas: El microorganismo no precisa de modificaciones genéticas porque dispone de lo necesario para la transformación del sustrato.</p> <p>Necesidad de oxígeno: Microorganismos aerobios.</p>	3
MEDIO	<p>Temperatura y pH de crecimiento óptimos: Tiene un rango de operación que puede ser alcanzado fácilmente pero un poco alejado de las propiedades de los residuos de fique.</p> <p>Condiciones necesarias para obtener sorbitol: El microorganismo requiere un tipo de ruta metabólica específica o condiciones de estrés para obtener el sorbitol.</p> <p>Necesidad de modificaciones genéticas: El microorganismo debe tener modificaciones genéticas para lograr la transformación del sustrato.</p> <p>Necesidad de oxígeno: Microorganismos aerotolerantes o facultativos.</p>	2
BAJO	<p>Tipo de microorganismo: Es un hongo diferente a las levaduras.</p> <p>Fuente de energía lumínica: El microorganismo requiere de una fuente de luz para crecer.</p> <p>Temperatura y pH de crecimiento óptimos: Tiene un rango de operación que no puede ser alcanzado fácilmente alejado completamente de las propiedades de los residuos de fique.</p> <p>Condiciones necesarias para obtener sorbitol: El microorganismo requiere tener en cuenta bastantes condiciones para llegar a producir sorbitol.</p> <p>Necesidad de modificaciones genéticas: El microorganismo debe tener modificaciones genéticas para lograr la transformación del sustrato, pero la producción de sorbitol no beneficia al microorganismo.</p> <p>Necesidad de oxígeno: Microorganismos anaerobios</p>	1

Nota. En la anterior tabla se describen los niveles y los motivos de esos niveles asignando para cada uno un valor a ser usado en la ponderación de la tabla 11, a su vez hay algunos parámetros que solo cuentan con dos niveles para su calificación los cuales se definieron como bajo o alto.

De esta forma se realiza una matriz de comparación y selección del microorganismo justificando 3 microorganismos productores de sorbitol y seleccionando el más adecuado para el desarrollo del proceso rellenando cada recuadro con un respectivo color explicado con los niveles y valores de la tabla anterior, siendo al final el de mayor valor el más apropiado para la ejecución del proceso de sorbitol.

Tabla 11.*Matriz de comparación y selección de microorganismos productores de sorbitol*

Parámetro	Microorganismos		
	<i>Zymomonas mobilis</i>	<i>Synechocystis sp. PCC 6803</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>
Tipo de microorganismo	Bacteria.	Cianobacteria.	Bacteria acidoláctica.
Fuente de energía lumínica	No necesita de luz como fuente de energía.	Necesita de una fuente de luz (como lámparas fluorescentes blancas).	No necesita de luz como fuente de energía.
Temperatura y pH de crecimiento óptimos	A 30-37°C. [48] pH 6,2. [49]	A 31°C y pH 7,8. [50]	A 37°C y pH 7. [51]
Condiciones necesarias para obtener sorbitol	Cuando se enfrenta a condiciones de estrés como presión osmótica, temperatura o pH, acumula sorbitol en el periplasma para darle más estabilidad a la célula y neutralizar este efecto. [9]	El sorbitol se produce fotosintéticamente e intracelularmente por lo que al final se necesita romper las células con un batidor (agitación) y extraer el producto con ayuda de centrifugación. [50]	Para obtener sorbitol se invierte la vía catabólica con el fin de dirigir el consumo de fructosa a la producción de sorbitol y extraer éste de las suspensiones celulares. [52]
Necesidad de modificaciones genéticas	Posee la enzima glucosa-fructosa oxidorreductasa que le permite convertir glucosa y fructosa en sorbitol y un poco de ácido glucónico. [53]	Requiere de modificaciones genéticas (SrID1), debido a que el sorbitol inhibe el crecimiento de la célula y necesita de enzimas producidas por <i>E. coli</i> como la S6PDH dependiente de NADPH. [50]	Requiere de modificaciones genéticas (SrID2 dependiente de NADH) para producir el sorbitol a partir de fructosa. [52]
Clasificación del microorganismo de acuerdo a la necesidad de oxígeno.	Anaerobia facultativa.	Aerobia.	Anaerobia.

Nota. Se presenta la matriz de ponderación con 3 microorganismos productores de sorbitol.

De acuerdo a la matriz anterior y a la ponderación total obtenida en cada microorganismo analizado, se selecciona a *Zymomonas mobilis* con una ponderación total de 16 como el mejor microorganismo que puede entrar al proceso para la producción de sorbitol. Así mismo por

ejemplo como el pH de los residuos se encuentra entre 4 y 5, para llegar al pH óptimo que requiere el microorganismo seleccionado que es de 6,2 se deberán usar sales en el medio de cultivo para elevar el pH de dichos residuos, además de usar altas concentraciones de sustrato para someter el microorganismo a condiciones de estrés para acumular más sorbitol en su interior.

Resumiendo, se plantea la elección de la explosión de vapor como método de pretratamiento para la eliminación de la lignina, así mismo, la hidrólisis enzimática para la transformación de los polisacáridos en azúcares fermentables como glucosa y fructosa mediante el uso de enzimas celulasas en condiciones de operación suaves de temperatura, así como rangos de pH entre 4,5 y 5,0, con el fin de evitar los problemas de corrosión. No obstante, “La eficacia del proceso de hidrólisis se rige por el grado de pretratamiento de la biomasa en términos de eliminación de lignina y solubilización de hemicelulosas, incluida la hidrólisis y la carga enzimática”. La economía global del proceso de producción de Sorbitol se puede mejorar operando la hidrólisis enzimática a una concentración de sustrato más alta de modo que se puedan aumentar los rendimientos de glucosa en el hidrolizado. Adicionalmente, la concentración de sustrato afecta la velocidad y extensión del proceso de hidrólisis [54]. A partir de los métodos y el microorganismo seleccionados anteriormente se da paso al diseño conceptual de la planta de producción de sorbitol, teniendo en cuenta que las propiedades fisicoquímicas del residuo de fique permiten dar una secuencia y condiciones de operación necesarias para la transformación del sustrato a sorbitol al interior de esta planta.

4. DISEÑO CONCEPTUAL PLANTA DE PRODUCCIÓN DE SORBITOL

Inicialmente para el diseño conceptual para la planta de producción de sorbitol del que se hablará en el capítulo actual se requiere la definición de la escala a producir, el factor de operación que tendrá la planta, las materias primas e insumos requeridos para el proceso, como se dará la ruta de producción que se verá representada principalmente mediante un diagrama de bloques, los equipos necesarios para llevar a cabo la obtención del sorbitol y el diagrama PFD en el que se reúne esta información. Esto permitirá que en el capítulo 5 se analicen los costos implicados en la producción del sorbitol para identificar la viabilidad del proceso.

4.1 Definición de la escala

De acuerdo a la OEC en Sudamérica Colombia es el que más importa sorbitol después de Brasil con un valor \$3,2 M USD correspondiente al 17,4% del total de \$18,4 M USD para el 2019. [55] En base a esto se define que la forma para suplir este mercado en el país debe ser a escala industrial, buscando satisfacer el 20% que corresponde a 640.000 USD de las importaciones anuales.

4.2 Factor de operación

La planta estará en operación todos los días, pero no de forma continua durante las 24 horas del día, esto se tomará como una operación batch (discontinua) debido a que en los lugares donde se hace el desfibrado la mayor parte del proceso se lleva a cabo en las horas de la mañana y una pequeña parte en la tarde (De 7am a 4pm). [1] Por lo cual el material la mayor parte del tiempo se empezaría a recibir en las horas de la tarde. Además de considerar que al inicio de la fermentación se debe agregar el inóculo para esta y que al final el producto celular debe ser retirado para iniciar con el siguiente lote. Según las importaciones analizadas anteriormente y los precios consultados en la plataforma de MERCK para el sorbitol sólido y en solución al 70% [56], [57], anualmente se deberán producir 4943,61 kg de sorbitol en forma de cristales sólidos y 1108,11 L de sorbitol líquido en solución al 70%, basándose en que se desea obtener el 50% del producto de forma sólida y el otro 50% a modo de solución.

Por otro lado, el departamento de Santander para el año 2017 produjo 1760 Ton de fique. [58] Considerando que el 70% del fique corresponde al jugo y el 25% es bagazo y estopa se tienen 1232 Ton/año y 440 Ton/año respectivamente, residuos de los cuales se planea aprovechar el 10% del

total como sustrato para producir sorbitol, es decir, 123,2 Ton/año de jugo de fique y 44 Ton/año de estopa y bagazo.

4.3 Materias primas e insumos

4.3.1 Residuos de fique

Como se presentó al inicio del trabajo el jugo de fique y demás residuos se obtendrán mediante el desfibrado de la planta de fique y serán la materia prima más importante del proceso debido a que mediante una serie de operaciones se tendrán posteriormente los azúcares necesarios para la fermentación por parte del microorganismo para producir sorbitol.

4.3.2 Ácido diluido y base para su neutralización

El ácido diluido es usado en conjunto con la explosión de vapor para transformar las cadenas de polisacáridos pertenecientes a los residuos de fique en sus monómeros más simples. Por otro lado, es importante mencionar, que la materia prima sometida a este ácido diluido tendrá un aumento en el área superficial, tamaño y volumen del poro en la pared celular, dicho aumento influye en la accesibilidad de la celulosa a celulasas durante la hidrólisis enzimática.

Hay que mencionar, además que el ácido que se suele utilizar es ácido sulfúrico (H_2SO_4) en una concentración entre 0,75% y 0,8% [59]. Sin embargo, los productos de la hidrólisis de hemicelulosas pueden generar la formación de furfurales y 5-hidroximetilfurfural (HMF) a partir de la degradación de hexosas, los cuales pueden ser tóxicos para los microorganismos utilizados en la fermentación. Para mitigar los efectos tóxicos de los productos de degradación, se recomienda realizar un proceso de detoxificación el cual consiste en reducir los compuestos tóxicos presentes en el hidrolizado para mejorar la fermentación, mediante el uso de una neutralización después del pretratamiento con una base que es el hidróxido de sodio (NaOH). [60]

4.3.3 Vapor de agua

Como describe J. J. Sánchez Mora al usarse la explosión de vapor como pretratamiento y al incluirse una evaporación se requiere de la entrada de vapor de agua que viene del calentamiento de agua en calderas que usan gas natural como combustible. [61]

4.3.4 Enzimas (*Hidrólisis enzimática e isomerización de glucosa*)

Para la producción de sorbitol se requiere de dos tipos de enzimas adicionales que son las siguientes:

Enzimas de tipo celulasas para la hidrólisis enzimática de la celulosa presente en los residuos de fique para obtener los azúcares fermentables que se pueden aislar de *Trichoderma reesei* como es el caso de la Celulasa (C6105). [62]

Enzima glucosa isomerasa para la isomerización posterior a la hidrólisis enzimática de celulosa con el fin de obtener más fructosa para ser convertida mediante la GFOR en más sorbitol y menos ácido glucónico durante la fermentación. La glucosa isomerasa puede ser obtenida o aislada de *Streptomyces sp.* [63]

4.3.5 Nutrientes del medio de cultivo e Inóculo

El microorganismo seleccionado para este estudio fue *Zymomonas mobilis* en donde el nitrógeno necesario para el crecimiento puede proporcionarse por medio de sales minerales, aminoácidos, extracto de levadura o péptidos. Los nitratos y nitritos no son asimilados por la bacteria. “El azufre, magnesio y potasio son proporcionados en forma de sales. Los oligoelementos (Mo, Fe, Mn, etc.) necesarios para el metabolismo de la bacteria, se encuentran en estado de trazas en las sales usadas en la preparación del medio de cultivo” [18].

Además del extracto de levadura y peptona algunas sales que pueden ser suministradas son $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, MgSO_4 , KH_2PO_4 [64] y la principal fuente de carbono vendrá de los azúcares de los residuos de fique. También, “normalmente el inóculo consiste de 30 mL. de un cultivo de la bacteria de 16 a 18 horas en medio básico suplementado con 2% de glucosa e incubado a 30° C. En estas condiciones el inóculo contiene 10^9 bacterias/mL aproximadamente” [65]. “Adicionalmente se debe tener en cuenta que dentro de las cepas de *Zymomonas mobilis* las más estudiadas son las cepas *Zymomonas mobilis* ZM4 (ATCC 31821) y *Zymomonas mobilis* ATCC 10988 (también conocida como *Zymomonas mobilis* ZM1). Sin embargo, dentro de estas dos se destaca la cepa ZM4 por su mayor velocidad de reproducción y tolerancia al etanol” [64].

4.3.6 Inmovilización del microorganismo con alginato de sodio

Para la fermentación se inmovilizará el microorganismo y se usará sin permeabilizar porque de acuerdo a la bibliografía consultada se ha reportado mayor producción bajo estas condiciones. [53] Así mismo para preparar células inmovilizadas se han usado técnicas como la descrita por N. F. Y. Tam y Y. S. Wong [66] y usada posteriormente por A. Ruiz-Marín, Y. Canedo-López, A. Narváez-García, y J. C. Robles-Heredia [67].

«Las bacterias y células se suspenden en agua destilada para obtener una suspensión celular concentrada. Esta suspensión se mezcla con una solución de alginato de sodio al 4% (1:1 v:v) para obtener una mezcla de suspensión de 2% microorganismos–alginato en forma de esferas. A continuación, las esferas se mantienen en solución de CaCl_2 ; para que se endurezcan, se enjuagan con una solución salina estéril (0.85 % NaCl) y después con agua destilada.» [67]

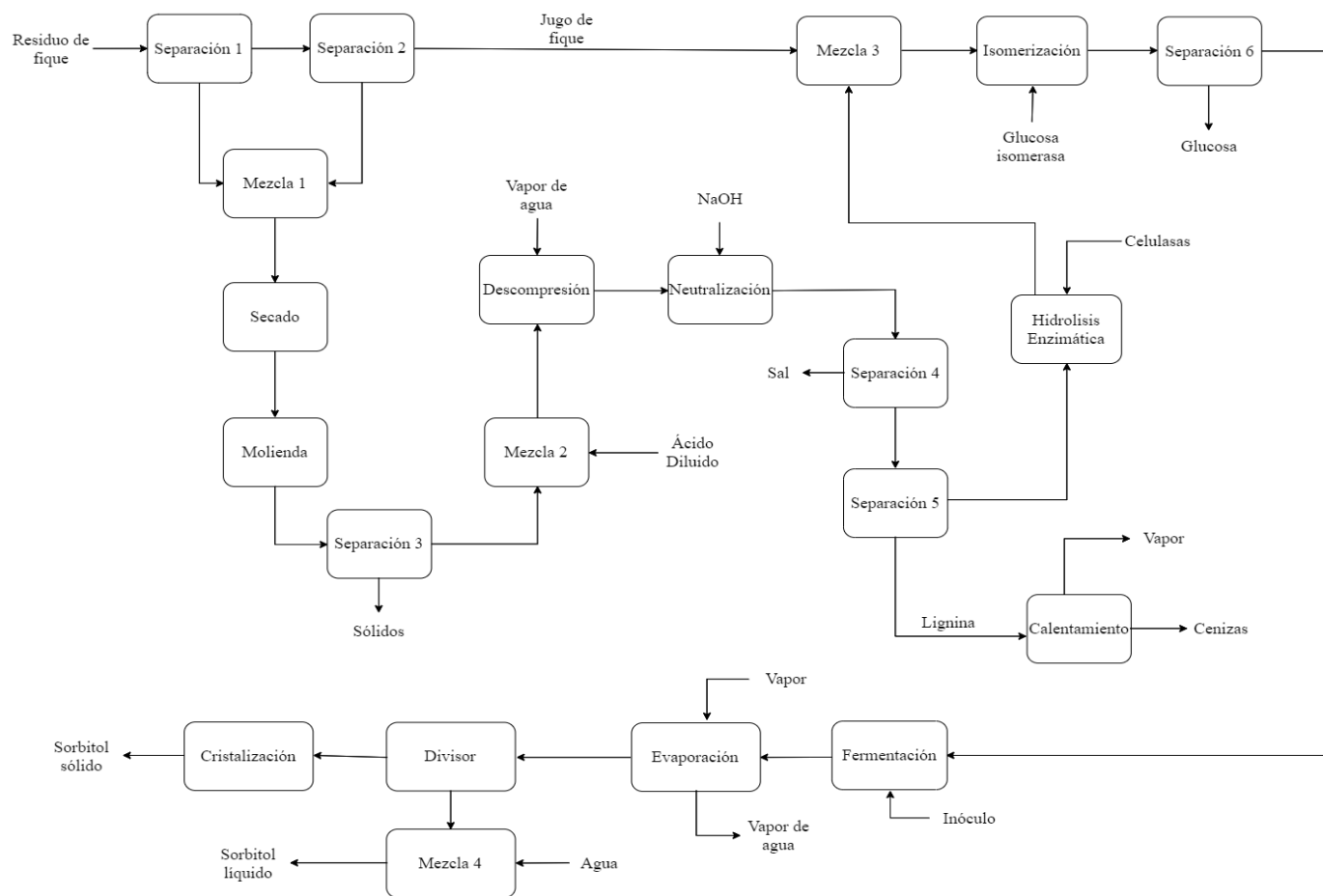
4.4 Diagrama de bloques de la ruta de producción

Para la ubicación de la planta de producción de Sorbitol, como se ha dicho anteriormente será en el departamento de Santander específicamente en la provincia Guanentina, dado que el departamento cuenta con la cercanía a las principales ciudades del país y a la frontera con Venezuela, permitiendo llegar a un mercado de más de 15 millones de habitantes. Así mismo, y de acuerdo con el DANE, para el 2019 Santander fue la cuarta economía más importante del país con una participación de 6,9%, además, la actividad industrial representa aproximadamente el 17,7% del PIB siendo la segunda más importante después de los servicios. Concentrándose de esta manera el 9,6% de la industria del país, y llegando a ocupar el quinto lugar por departamento. Por otra parte, es importante señalar que a pesar de la coyuntura provocada por la pandemia Santander ha venido aumentando su participación en el mercado un 1,6% para el 2019 y un 2% para el 2020.[68]

En esta provincia se selecciona el municipio del valle de San José como el lugar más apropiado para la instalación de la planta por sus planicies. Este cuenta con una humedad promedio de 75%, aproximadamente 1 atm de presión, con una temperatura mínima de 18°C y una máxima de 27°C.[69]

Figura 6.

Diagrama de bloques BFD para la producción de sorbitol



Nota. Elaboración propia.

4.5 Equipos involucrados y descripción del proceso

4.5.1 Separación 1

Al recibir los residuos de fique este se debe someter a una primera separación. Esto con el objetivo de separar las partículas sólidas o semisólidas que se encuentran suspendidas en la materia prima a través de un medio filtrante que puede estar en forma de poros, fibras o gránulos, usando a su vez una fuerza impulsora.

Otro punto a favor para la implementación de la filtración al inicio del proceso productivo es la posibilidad de una clarificación del líquido, y de esta manera facilitar las operaciones de pretratamiento del jugo y el bagazo de fique. Además de lo dicho anteriormente se deben tener en consideración las variables que afecten el proceso de filtración, ya que estas variables son el punto de partida para seleccionar, diseñar u operar el equipo, algunas de estas son: la concentración de los sólidos, el tamaño de partícula, la temperatura, el área de filtración, el flujo de filtración y demás. [70]

4.5.2 Separación 2

Se realiza una separación contigua a la anterior, con el objetivo de terminar de retirar el bagazo aún presente en la corriente de entrada para separarlo del jugo de fique. Esta segunda separación consiste en una clarificación de suspensiones, concentración de sólidos y separación de mezclas como la del jugo de fique con eliminación simultánea de sólidos.

Es decir, la centrifugación es una decantación selectiva de los componentes insolubles presentes en el jugo de fique que se efectúa bajo condiciones de gravedad artificial. Al mismo tiempo, en esta separación el jugo de fique de salida será sometido a un tratamiento posterior al igual que el bagazo de fique. Estas dos corrientes deben tratarse de forma diferente por tal razón es tan importante efectuar estas dos separaciones.

4.5.3 Secado

En esta sección se mezclan las dos corrientes resultantes de la separación 1 y 2 que principalmente están compuestas por bagazo de fique, lo anterior con el fin de generar una sola corriente que será enviada a un proceso de secado. Así mismo el secado tiene como propósito la eliminación de agua

del bagazo de fique, y de esta manera obtener un producto sólido y seco. Para empezar a entender la producción de sorbitol debemos tener en cuenta los fenómenos presentes en el secado, primero hablamos de la transferencia de energía de los alrededores, y como segunda parte tenemos una transferencia de humedad del interior hacia la superficie del sólido. [71]

Por otro lado, debemos hablar del equipo donde se efectuará esta operación, siendo este un horno de secado, cuyo funcionamiento se lleva a cabo principalmente por convección del aire. Dónde el bagazo de fique se lleva a una temperatura superior a la del ambiente con la finalidad de retirar el porcentaje de humedad presente y de esta manera poder facilitar su traslado a la siguiente operación. [72]

4.5.4 Molienda

El producto obtenido del proceso de secado es llevado a una molienda, dónde se lleva a cabo una reducción del tamaño de partícula. Por tal razón cabe señalar que el equipo a implementar en esta operación es un molino rotatorio, dónde se implementa una combinación de fuerzas de impacto y de cizalla sobre el bagazo de fique seco bajo una alta presión. Para comprender mejor el sistema de reducción de tamaño, las bolas que se encuentran dentro del equipo están completamente sueltas, móviles y tienen un tamaño considerablemente grandes o pesadas al ser comparadas con el bagazo de fique. “Las bolas se mueven a medida que va rotando el tambor y de esta manera la fuerza de gravedad supera la fuerza de cohesión, de modo que van cayendo y rompiendo las partículas por impacto” [73]. Lo anterior con el fin de reducir el tamaño de partícula y así incrementar la superficie de contacto para el pretratamiento con explosión de vapor y ácido diluido.

4.5.5 Separación 3

El producto proveniente del proceso de molienda es trasladado a un tamiz para separar las partículas con diferentes tamaños, haciendo uso de una malla metálica que está constituida por barras entrecruzadas. El bagazo de fique seco y triturado se hace pasar por una serie de tamices de diferentes tamaños de separación. Adicionalmente se debe implementar un tipo de tamiz vibratorio ya que este se implementa para grandes capacidades, situación que es ventajosa para la producción de sorbitol.

4.5.6 Explosión de vapor (Descompresión)

El residuo ya tamizado es llevado al pretratamiento de explosión de vapor y ácido diluido, pretratamiento que fue explicado en el capítulo 3. Por otro lado, en esta sección se explicará a grandes rasgos el equipo de explosión de vapor, también ha sido reconocido como el método más adecuado para maderas duras y residuos agrícolas, dicho lo anterior el sistema está compuesto por un tanque preferiblemente de acero inoxidable, al cual se le integra un generador eléctrico de vapor que genere ese cambio brusco de presión dentro del tanque. Aparte de lo dicho se deben considerar ciertas variables para el pretratamiento de explosión de vapor que son la temperatura, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula y por último la humedad. [74]

4.5.7 Neutralización y filtración

En esta etapa se neutraliza el ácido diluido con un exceso de NaOH para así ser retirado en forma de sal para mitigar los efectos tóxicos de los productos de degradación. Sin embargo, si estos inhibidores se eliminan mediante lavado o filtración puede haber una pérdida de monosacáridos fermentables. Posteriormente en la separación 4 se utiliza un filtro mediante el cual se separa dicha sal en forma sólida. Además de que con esta neutralización se previene cualquier daño que este ácido le pueda ocasionar al microorganismo en la fermentación, la posible corrosión en equipos y ser químicamente reactivo con algunos de los compuestos.

4.5.8 Separación 5

Posteriormente a la separación de la sal se implementa un filtro molecular que basa su funcionamiento en la absorción para separar la lignina residual del resto de polisacáridos, es decir, las moléculas a separar se adhieren a la superficie del absorbente. Por otro lado, se debe entender y seleccionar el mejor absorbente, en dónde esté se caracteriza por ser poroso; a simple vista tienen una estructura sólida, pero al ser sometidos a observaciones microscópica tenemos una estructura de fisuras y orificios que están interconectados de distintos tamaños. Actualmente existen gran variedad de absorbentes comerciales, la mayoría de ellos son fabricados con carbón activado o alúmina activada y de este dependerá la calidad del filtrado. [75]

4.5.9 Calentamiento (Generación de vapor)

Cuando hablamos de calentamiento hacemos referencia a la generación de vapor mediante el aumento de la temperatura de la lignina que se obtuvo en la separación 5 para generar unas cenizas y un vapor que pasará por una turbina con un generador de electricidad para de esta manera poder minimizar los costes energéticos. Para el proceso se implementa un calentamiento por inducción que es un proceso rápido, altamente eficiente y seguro. Además de lo dicho anteriormente el equipo que se utilizará para efectuar este calentamiento será un horno, equipo que fue descrito en la sección de secado con una temperatura de operación inferior y un tiempo de residencia inferior al del secado.

4.5.10 Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática como se había explicado anteriormente es utilizada para la reducción de los polisacáridos que componen la biomasa en sus respectivos monosacáridos o azúcares reductores. Esta técnica ha ido creciendo en la industria al pasar los años ya que permite la reducción de los costos de producción. Inicialmente se plantea operar la hidrólisis enzimática de manera semibatch, de modo que se pueda adicionar el sustrato y/o las enzimas en los diferentes tiempos de la reacción y de esta manera aumentar las concentraciones del sustrato al finalizar la hidrólisis. [76] Por esta razón se tomó la decisión de utilizar un reactor de tanque agitado (CSTR).

4.5.11 Isomerización

En este punto del proceso se tiene una corriente en la cual se encuentran mezclados el jugo de fique y el bagazo de fique pretratado. De acuerdo a E. Papadakis, S. Pedersen, A. K. Tula, M. Fedorova, J. M. Woodley, and R. Gani la isomerización se realiza en un conjunto de reactores de lecho fijo, en donde la enzima está químicamente unida al reactor, es decir, se encuentra en el lecho de este equipo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el flujo de entrada tiene que irse ajustando a medida que la actividad enzimática va disminuyendo en el transcurso de la reacción. Además, las temperaturas demasiado bajas deben evitarse ya que esto puede llevar al riesgo de contaminación microbiana del sustrato y por otro lado las temperaturas más altas deben evitarse ya que pueden inactivar la enzima. [77]

En cuanto a la inactivación de la enzima, esto da paso a qué la tasa de productividad en el reactor se disminuya gradualmente hasta llegar al agotamiento de la actividad enzimática. Dicho lo anterior, se plantea mantener un equilibrio mediante la implementación de una secuencia de reactores y cada uno de ellos inicie su operación en diferentes tiempos. De esta manera podemos hablar de que este proceso es de gran importancia para la producción de sorbitol, debido a que pasamos de glucosa a fructosa y esta será la fuente de carbono para el microorganismo presente en el reactor de fermentación.

4.5.12 Separación 6

Para esta separación se usará el intercambio iónico, cuando hablamos de un intercambio de iones, hacemos referencia a un proceso en el cual los iones móviles de la corriente de salida del proceso de isomerización se intercambian con iones que se encuentran unidos a la matriz sólida. Dicho lo anterior el intercambio iónico comparte algunas similitudes con la adsorción, cómo es la transferencia de masa del fluido en la fase sólida, pero el factor diferencial entre estas dos operaciones es la naturaleza de las especies adsorbidas, siendo iones para el intercambio iónico, en este proceso los iones que son eliminados de la fase líquida son cambiados por los iones de la fase sólida.

Por otro lado, el reactor de lecho fijo es el equipo operacional más utilizado para el intercambio iónico, en donde la fase líquida es alimentada por el fondo del lecho, se realiza de esta manera ya que proporciona una mejor calidad en el flujo y una interacción completa con el material. De esta forma eliminamos la glucosa residual del proceso de isomerización. [78]

4.5.13 Fermentación

En la fermentación se utilizará el microorganismo *Zymomonas mobilis* para la producción de sorbitol a las condiciones óptimas de crecimiento mencionadas anteriormente en el capítulo 3 donde se hizo su selección. Este proceso se lleva a cabo en un biorreactor, mediante el cual un sustrato que son los residuos del fique tratado que componen el medio de cultivo son transformados por la acción del microorganismo en sorbitol. Adicionalmente es beneficioso el operar el reactor a altas concentraciones de sustrato, ya que esto influye en la acumulación de sorbitol en el microorganismo, al mismo tiempo que el microorganismo va aumentando su concentración en el transcurso del tiempo de reacción. No obstante, los biorreactores químicos están diseñados para

aumentar la conversión y la selectividad de la reacción y de esta manera poder reducir los costos de operación. Por ende, el equipo se constituye como una unidad de proceso, con forma de recipiente cerrado. Este proceso se lleva a cabo en un biorreactor por lotes, es decir, que trabaja en estado no estacionario y así finalmente se obtendrá el sorbitol, contando con el ingreso del inóculo y nutrientes para que la reacción de conversión se lleve a cabo. [79]

4.5.14 Evaporación

La evaporación es una de las operaciones más relevantes en el proceso, ya que permite tener una concentración de sorbitol. Según L. E. Ayala Padilla, J. A. Pabón Beltrán, y F. Correa-Mahecha esta operación consiste en la implementación de calor a la corriente proveniente de la fermentación para evaporar el disolvente presente, usualmente los evaporadores utilizan vapor de agua para ser calentados, el cual se condensa en tubos metálicos. [80] Al terminar la evaporación la corriente de salida es llevada a un divisor en donde se quiere obtener dos corrientes una que va dirigida a un cristizador y la otra es llevada a un tanque de agitación con agua. Esto se realiza con el objetivo de tener dos formas de comercialización del sorbitol, una en estado sólido como son los cristales y otra en estado líquido o en forma de jarabe (Tanque de agitación).

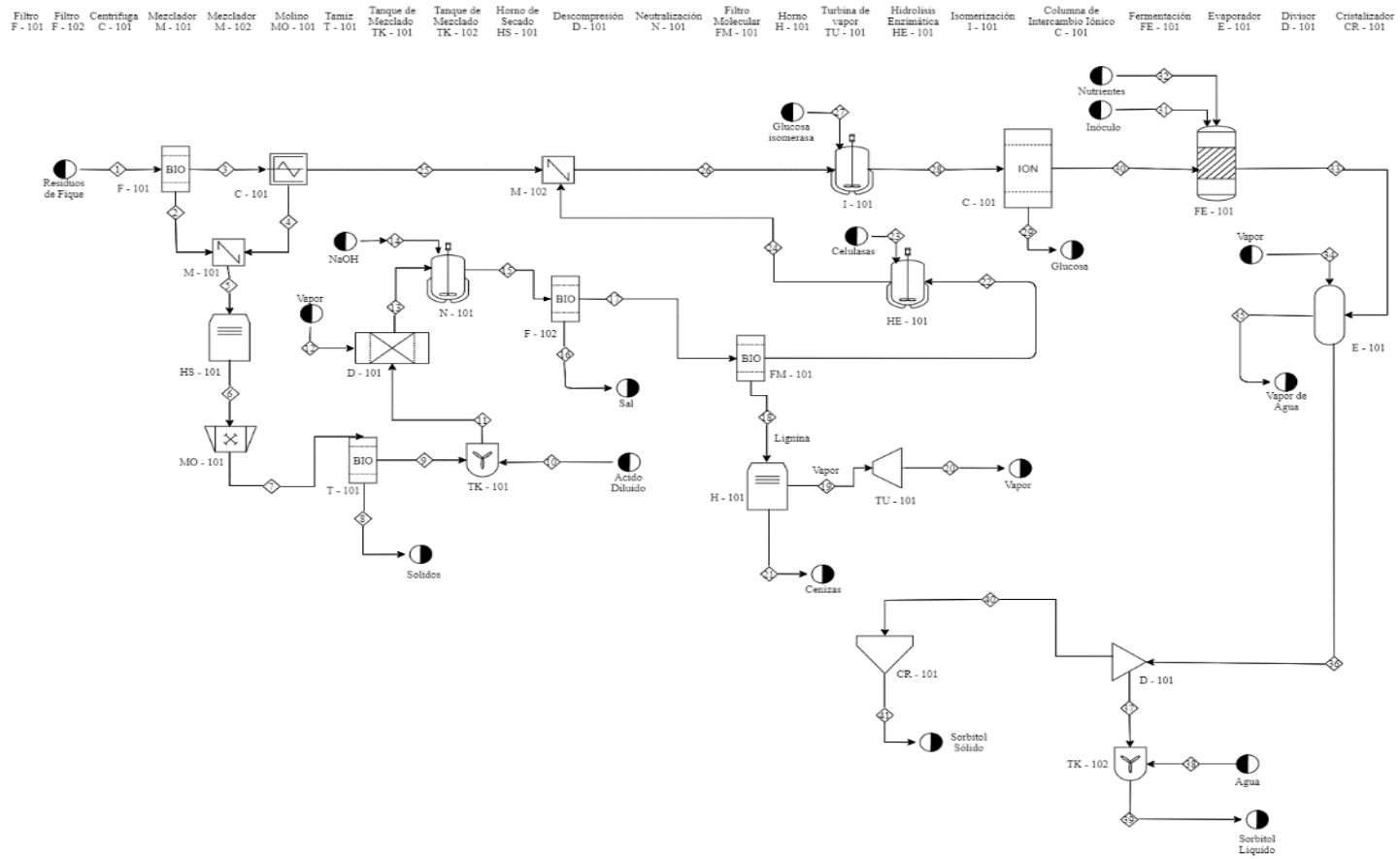
4.5.15 Cristalización

La cristalización es utilizada como una forma de presentación y venta del sorbitol. La utilización de cristalizadores favorece la nucleación secundaria y de tal manera se puede tener un control del tamaño de los cristales. También se debe tener en cuenta el tiempo de residencia ya que de esto depende la generación de energía, es decir favorece el crecimiento de los cristales. Dentro de los procesos de cristalización tenemos dos que son los más utilizados uno por enfriamiento y otro por evaporación. Para efectos del trabajo se llevará a cabo una cristalización por evaporadores, específicamente en un cristizador de circulación forzada, la cristalización se produce por medio de una evaporación y generalmente opera a presiones de vacío, también dispone de un equipo de bombeo que evita la ebullición en los tubos del intercambiador de calor y de esta manera se asegura la evaporación exclusivamente en el separador, donde el disolvente se evapora. Por otra parte, este equipo es de uso general y el tamaño del cristal no es de gran interés. [81]

4.6 Diagrama PFD

Figura 7.

Diagrama PFD para la producción de sorbitol



Nota. Elaboración propia.

Tabla 12.*Variables manipuladas por equipo*

Equipo	Variables Manipuladas	Variables de Respuesta
Tamiz	Tamaño de partícula.	Materia separada
Centrífuga	Presión y flujo volumétrico	Presión
Mezclador	Tiempo de residencia	Masa combinada
Horno	Temperatura y tiempo de residencia	Humedad retirada
Molinos	Tasa de alimento y la tasa de agua adicionada.	Materia triturada
Filtros	Presión y tamaño del filtro	Materia separada
Reactores	Tiempo de residencia y Volumen	Temperatura y presión de salida
Cristalizador	Flujo de aire.	Materia sólida.
Evaporador	Flujo de vapor de entrada.	Vapor de salida.
Divisor	Fracción de separación	Masa separada.
Turbina	Temperatura	Conversión de energía
Columna de Intercambio Iónico	de Presión, tiempo de residencia, matriz sólida de intercambio	Presión, flujos de salida y temperatura

Nota. Variables manipuladas de cada equipo del proceso de producción de Sorbitol.

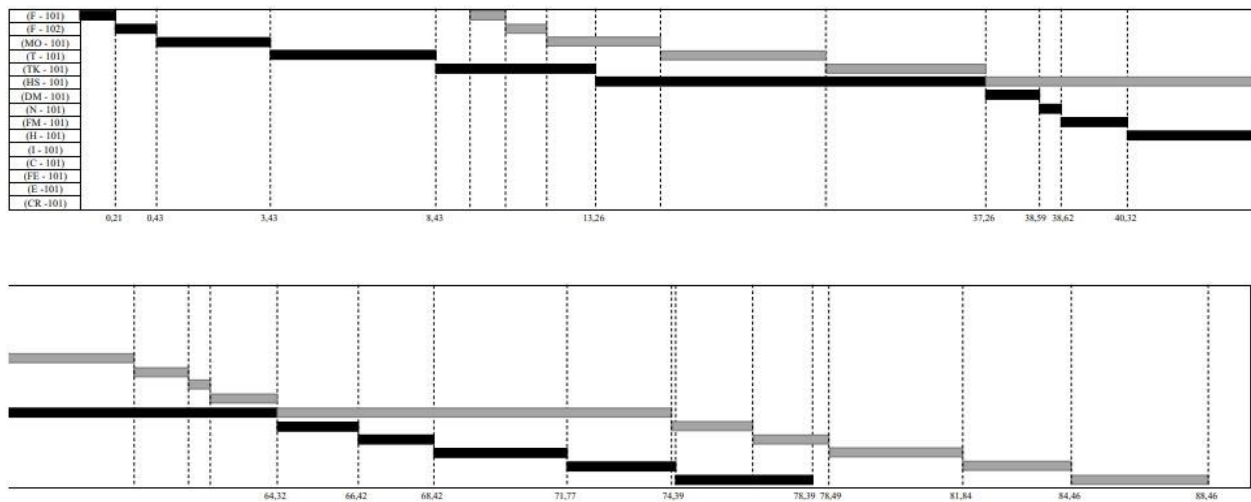
Elaboración Propia.

Para el proceso de producción de sorbitol, debe existir el control de la fabricación del producto obtenido al ser un proceso muy variable y al abarcar dos formas de presentación para su comercialización. Por esta razón es necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes como las representadas en la tabla 12. Adicionalmente cabe mencionar que una variable es cualquier elemento que posee características dinámicas, estáticas, químicas y físicas bajo las condiciones de operación de la planta de producción, que constantemente deben ser medidas y son capaces de adoptar un valor.

4.7 Diagrama Gantt

Figura 8.

Diagrama Gantt del proceso de producción de sorbitol



Nota. En los diagramas se encuentran los equipos tipo batch usando el tiempo en horas. Elaboración propia.

La elaboración del diagrama de Gantt, se emplea para planificar y programar tareas a lo largo de un periodo determinado de tiempo. Al tener un panorama más amplio de las acciones a realizar, permite realizar el seguimiento y control del progreso de cada una de las etapas de la producción de sorbitol. Así mismo, al implementar este diagrama con los equipos que se manejan de manera batch, se obtiene que un lote podría tardar aproximadamente 78h, pero además si se manejan los

dos hornos de secado de manera continua se optimizará el tiempo de producción de dos lotes a un tiempo total de 88h aproximadamente, teniendo así una reducción de 68h al montar los dos lotes.

En relación con lo expuesto en los capítulos anteriores y con el actual capítulo, podemos dar paso a un análisis de costos, puesto que, al tener ya seleccionado la secuencia de producción, el microorganismo y demás requerimientos para la producción de sorbitol, se obtienen los datos necesarios para realizar dicho análisis.

5. COSTOS DEL PROCESO

En este capítulo se presentan los costos de capital y los costos de producción a tener en cuenta para el desarrollo del proceso de producción de sorbitol a escala industrial. Todos estos costos se evaluarán en el departamento de Santander, específicamente en la zona guanentina, donde se ubicarán las instalaciones de la planta.

5.1 Costos de capital

Es de gran importancia el tener en cuenta los costos de capital, ya que estos nos permiten determinar si el proyecto cuenta con la suficiente solidez económica para llevarse a cabo. Al mismo tiempo se debe llevar un seguimiento detallado y riguroso, lo cual aporta al constante mejoramiento de la industrialización del sorbitol, permite analizar qué modelo financiero sería el más adecuado dependiendo si se cuenta con financiación propia o una financiación por medio de terceros, se detectan las necesidades y los beneficios del proyecto y para finalizar nos permite determinar el costo unitario de producción.

Tabla 13.*Costos de equipos y maquinaria*

Equipo y Maquinaria	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	Referencia
Tamiz	1	USD\$ 7.995,00	USD\$ 7.995,00	[82]
Centrífuga	1	USD\$ 30.000,00	USD\$ 30.000,00	[83]
Mezclador	4	USD\$ 6.260,76	USD\$ 25.043,04	[84]
Horno	2	USD\$ 3.605,80	USD\$ 7.211,60	[85]
Molinos	1	USD\$ 7.500,00	USD\$ 7.500,00	[86]
Filtros	2	USD\$ 3.000,00	USD\$ 6.000,00	[87]
Reactores	4	USD\$ 7.400,00	USD\$ 29.600,00	[88]
Cristalizador	1	USD\$ 3.999,00	USD\$ 3.999,00	[89]
Evaporador	1	USD\$ 15.000,00	USD\$ 15.000,00	[90]
Divisor	1	USD\$ 236,00	USD\$ 236,00	[91]
Filtro Molecular	1	USD\$ 109,69	USD\$ 109,69	[92]
Turbina	1	USD\$ 320.000,00	USD\$ 320.000,00	[93]
Columna de Intercambio Iónico	1	USD\$ 10.000,00	USD\$ 10.000,00	[94]
Total	21	-	USD\$ 462.694,33	-

Nota. En la tabla se representan los costos de la maquinaria y equipos involucrados en la producción de sorbitol. Tomado de: La recopilación de los datos se hicieron de diferentes fuentes en la página de Alibaba.

Los costos de capital anteriormente detallados permiten expresar el costo de los recursos invertidos en la producción de Sorbitol ya sean provenientes de los acreedores o propietarios, y así ser

utilizado como indicador para los accionistas. Es decir, este costo se constituye en una herramienta importante para la valoración del proyecto, dado que puede servir como la tasa de descuento usada para la medición del Valor Presente Neto (VPN) de los rendimientos expresados de una alternativa de inversión o de los flujos de caja futuros de la empresa.

5.2 Costos de producción

5.2.1 Mano de obra

5.2.1.a Mano de obra directa. Al evaluar los costos de la mano de obra directa, se plantean una jornada laboral de 36 horas por turnos sucesivos, debido a que la materia prima se recibirá en horas de la tarde, dado que en horas de la mañana generalmente se lleva a cabo el proceso de desfibrado. Por otra parte, los salarios se establecieron con base en el salario promedio que se encuentran en el Código Sustantivo del trabajo (CST), donde se encuentran los valores de compensación de los empleados. Al mismo tiempo la planta se considerará una mediana empresa.

En cuanto a los tipos de contrato a manejar serán contratos a término fijo, contratos de obra o labor y contrato de aprendizaje. Adicionalmente los pagos de los respectivos recargos se hacen de acuerdo al artículo 168 del CST y se efectuará de acuerdo al salario devengado de cada empleado, siendo estos recargos los siguientes:

Tabla 14.*Horas extras y recargos*

Tipo de Hora	Diurna	Nocturna	Referencia
Ordinaria	0	35%	
Ordinaria Dominical	75%	110%	
Extra	25%	75%	[95]
Extra Dominical o Festiva	100%	150%	

Nota. La tabla representa los recargos que se deben aplicar al salario devengado por cada uno de los empleados implicados. Tomado del Artículo 168 del CST.

Tabla 15.*Costos salariales de la mano de obra directa*

Oficina	No. de Empleados	Sueldo Mensual	Sueldo Anual	Referencia
Laboratorista	2	\$ 1'450.000	\$ 17'400.000	[96]
Ingeniero Químico	1	\$ 2'250.000	\$ 27'000.003	[97]
Ingeniero Producción	1	\$ 2'000.000	\$ 24'000.000	[98]
Técnicos de Mantenimiento	1	\$ 1'150.000	\$ 13'800.000	[99]
Operarios de Producción	8	\$ 877,803	\$ 10'533.636	[100]
Asistentes de producción	4	\$ 1'032.029	\$ 12'384.348	[101]
Total	17	\$ 8'759.832	\$ 105'117.984	-

Nota. Los datos de la tabla representan los promedios salariales de cada empleado para el año 2021. Así mismo se entiende que los profesionales más experimentados sobrepasaron este promedio y los menos experimentados estarán sobre este valor o inferior. Tomado de la página de datos sobre salarios de Talent.

Además de los costos de salario de los 17 empleados pertenecientes a la mano de obra directa, los trabajadores tienen derecho al pago de su seguridad social, aportes los cuales son pensión, salud y ARL, dónde el monto sobre el cual se calculará cada porcentaje de cotización será sobre el Ingreso Base de Cotización (IBC).

5.2.1.b Mano de obra Indirecta. Cuando se habla de mano de obra indirecta se hace referencia a todos aquellos trabajadores que se encuentran en la dirección de la actividad productiva, es decir, que no se encuentran relacionados directamente con el proceso de producción del Sorbitol. Dentro de sus tareas en la industria encontramos la parte administrativa, directivas y las de gestión comercial.

En relación con los costos salariales para la mano de obra indirecta se maneja de igual manera que el apartado anterior, los recargos, horas extras y pagos de seguridad social serán los mismos. Con la diferencia que los cargos de los trabajadores serán diferentes.

Tabla 16.*Costos salariales de la mano de obra indirecta*

Oficina	No. de Empleados	Sueldo Mensual	Sueldo Anual	Referencia
Gerente General	1	\$ 5'000.000	\$ 66'000.000	[102]
Secretaria	1	\$ 1'000.000	\$ 12'000.000	[103]
Gerente de Ingeniería	1	\$ 5'375.000	\$ 64'500.004	[104]
Gerente de Ventas	1	\$ 4'000.000	\$ 48'000.000	[105]
Administrador	1	\$ 1'489.886	\$ 17'878.633	[106]
Contador	1	\$ 2'092.053	\$ 25'104.635	[107]
Ingeniero Industrial	1	\$ 2'000.000	\$ 24'000.000	[108]
Gerente de Producción	1	\$ 4'000.000	\$ 48'000.000	[109]
Director de recursos Humanos	1	\$ 3'800.000	\$ 45'600.000	[110]
Abogado	1	\$ 2'486.415	\$ 29'836.977	[111]
Jefe de Investigación y Desarrollo	1	\$ 4'000.000	\$ 48'000.000	[112]
Total	11	\$ 35'178.465	\$ 428'681.585	-

Nota. Los datos de la tabla representan los promedios salariales de cada empleado para el año 2021. Tomado de la página de datos sobre salarios de Talent.

Es importante tener presente los costos involucrados debido a los 11 trabajadores que pertenecen a la mano de obra indirecta, donde estos empleados realizan tareas en el área administrativa del proyecto, ya que sirven de apoyo a la producción y al comercio. Así mismo se entiende que los profesionales más experimentados sobrepasaron este promedio y los menos experimentados estarán sobre este valor o inferior.

5.2.2 Materia prima e insumos

Para hablar de los costos de la materia prima se debe entender qué importancia tiene esta para la industria y así se dimensionará el impacto que esta tiene en una primera inversión y el seguimiento en inversiones futuras, ya que es un costo variable. En otras palabras, la materia prima es el punto de partida para la producción de Sorbitol y de la calidad de esta dependerá la calidad del producto de interés. Por tal razón el precio de adquisición de la materia prima incide en los precios de comercialización del Sorbitol, puesto que para esto se tienen factores operativos como es la cantidad de residuo de fique que ingresa al proceso productivo, su dificultad al momento de hacer la extracción o simplemente la dificultad de transformarla a los requerimientos nutricionales para que el microorganismo lo transforme en Sorbitol.

Dicho lo anterior y para la cuantificación de los costos en materia prima se deben tener en cuenta diversos aspectos como son los precios de compra, ya que la base del proceso industrial, los inventarios, es decir, los residuos de fique guardada o almacenada para así enfrentar las situaciones de retraso, escasez y demás, y los costos involucrados a dicho almacenamiento y por último aspecto tenemos la calidad, ya que la materia prima de una buena calidad garantiza un Sorbitol de una calidad afín, y por tal razón un mayor precio de adquisición en el mercado.

En relación con lo dicho en el transcurso del documento y en este segmento no se tendría un valor por los residuos provenientes del desfibrado, considerando que los campesinos de la zona lo desechan por falta de conocimientos o por desinterés en su aprovechamiento, en relación con esto se propone una remuneración monetaria de un valor de 85 USD por tonelada y de esta manera incentivar el interés de los agricultores por conservar y aprovechar este residuo agrícola.

Tabla 17.*Costos de materias primas e insumos*

Descripción	Valor	Unidad	Referencia
Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	96,35	USD / L	[113]
<i>Zymomonas mobilis</i> (ZM4)	402,00	USD / ud	[114]
Celulasa de <i>Trichoderma reesei</i>	3111,20	USD / L	[115]
Glucosa isomerasa de <i>Streptomyces murinus</i>	11098,20	USD / Kg	[116]
Extracto de levadura	273,97	USD / Kg	[117]
Peptonas	255,40	USD / Kg	[118]
(NH ₄) ₂ SO ₄	132,34	USD / Kg	[119]
MgSO ₄	210,12	USD / Kg	[120]
KH ₂ PO ₄	161,37	USD / Kg	[121]
NaOH	221,97	USD / Kg	[122]
Alginato de sodio	335,26	USD / Kg	[123]

Nota. En la tabla se representan los precios de algunos de los insumos necesarios para la producción de sorbitol. Tomado de páginas como Merck Sigma Aldrich y ATCC.

Las materias primas son un factor de gran relevancia, debido a que es la base de la producción de sorbitol. Son aquellas materias que serán transformadas durante el proceso de producción para dar lugar al producto final. Haciendo parte de los costos variables, es decir, a más unidades producidas, más material utilizado.

Los costos del proceso hacen referencia a los gastos que se incurren al colocar en marcha la producción de sorbitol. El mantenimiento de las máquinas, el consumo de energía, el precio de la materia prima o el salario de los trabajadores forman parte de las cosas que van sumando a dichos costos. Todo esto con el objetivo de comercializar un producto de calidad, y por esta razón es de vital importancia el implementar controles de calidad al momento de recibir la materia prima,

controles en los procedimientos de cultivo y desfibrado del fique por parte de los campesinos, además de lo anterior es indispensable el realizar mantenimientos predictivos de los equipos involucrados con el fin de asegurar la calidad del producto, por otro lado es necesario el controlar las condiciones de operación de la explosión de vapor, la columna de intercambio iónico y el reactor de fermentación, ya para terminar la estrategia de manejar dos presentaciones de comercialización permite tener una mayor participación en el mercado a la vez de una gran versatilidad al operar de forma batch.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo el presente proyecto de grado se concluye que:

Los residuos de fique poseen una gran posibilidad de ser transformados en sorbitol ya que por medio de pretratamientos y tratamientos este residuo puede llegar a ser el sustrato adecuado para llevar a cabo la fermentación y posterior obtención del metabolito. Así mismo cabe mencionar que se cuenta con una gran disponibilidad de esta materia prima recordando que después del desfibrado el 4% es fibra y el 96% es residuo.

De las características analizadas los residuos de fique en general poseen gran variedad de minerales y oligoelementos que pueden ser aprovechados al momento de la fermentación con el microorganismo, no obstante los residuos de fique cuentan con otras propiedades fisicoquímicas, siendo una de ellas el porcentaje de sólidos totales con un valor de 19,32 % p/p en el bagazo de fique y en el jugo de fique con un valor de 68,8 g/L, al mismo tiempo el jugo de fique tiene un promedio de glucosa de 12,37 g/L, sacarosa de 4,98 g/L y fructosa de 18,02 g/L., del mismo modo el promedio en pH del residuo de fique es de 4,33, la humedad es de 87,14%, y en cuanto al promedio en polisacáridos en celulosa se tiene el 43,31%, en hemicelulosa 26,17% y por último la lignina tiene un valor de 17,06%.

El tratamiento más adecuado para los residuos de fique es la explosión de vapor, debido a su eficiencia en el tratamiento de residuos industriales, su bajo impacto al medio ambiente al hacer uso de un ácido diluido que será eliminado en forma de sal y la utilización de enzimas que permiten romper los enlaces de la hemicelulosa y la celulosa, de igual forma se plantea la isomerización de glucosa a fructosa para estimular el consumo de este azúcar por parte del microorganismo.

El diseño conceptual de la producción de sorbitol, se planteó de tal manera que se pudiera tener la mayor pureza de esta sustancia y de forma que se logre comercializar en presentaciones tales como en solución o en cristales sólidos, además de esto se implementaron equipos que facilitarán la transformación del jugo y el bagazo de fique en sorbitol y tuvieran la menor afectación al medio ambiente. Adicionalmente en base a las importaciones analizadas anualmente se deberán producir 4943,61 kg de sorbitol en forma de cristales sólidos y 1108,11 L de sorbitol líquido en solución al 70%

Al analizar los costos de producción se obtuvieron costos por mano de obra directa igual a USD \$285.705,71 para un total de 17 empleados, por otro lado los costos de mano de obra indirecta son iguales a USD\$ 110.826,88 para los 11 empleados que pertenecen a la parte administrativa del proyecto, dentro de los costos de producción también tenemos los costos de materia prima de los cuales las enzimas y el microorganismo son los más representativos, pero para el caso del microorganismo solo se tendría que hacer una primera inversión para conseguir la cepa y seguir cultivándola, finalmente se habló de los costos de capital donde estos tienen un valor de USD \$ 462.694,33.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Duque, “Optimización de los subproductos del Fique” Cali, Colombia, 2011. [PDF]. Disponible:
https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/78814/1/duque_sistema_fique_2011.pdf , Acceso: ago,20,2021.
- [2] Guía Ambiental Del Subsector Fiquero, 2^{da} ed, Cadena Productiva Nacional del Fique - Cadefique, Colombia, 2006, pp 122. [En línea]. Disponible:
http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6697/1/2007222154336_GuiaAmbientalfiquera2006.pdf
- [3] S. A. Ovalle-Serrano, C. Blanco-Tirado, M. Y. Combariza, “Exploring the composition of raw and delignified Colombian fique fibers, tow and pulp,” *Cellulose*, vol. 25, no. 1, pp. 151–165, 2018, DOI: 10.1007/s10570-017-1599-9. [Acceso: agosto 20, 2021].
- [4] Y. C. Park, E. J. Oh, J. H. Jo, Y. S. Jin, J. H. Seo, “Recent advances in biological production of sugar alcohols,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 37, pp. 105–113, 2016, DOI: 10.1016/j.copbio.2015.11.006. [Acceso: octubre 25, 2021].
- [5] M. Silveira, R. Jonas, “The biotechnological production of sorbitol,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, no. 4–5, pp. 400–408, 2002, DOI: 10.1007/s00253-002-1046-0. [Acceso: octubre 25, 2021].
- [6] J. G. A. B. Silva, R. de S. Bispo, A. D. da S. Ruy, Y. Delgado-Arcano, L. A. M. Pontes, “Economic and technological aspects of chemical sorbitol production/Aspectos económicos y tecnológicos de la producción de sorbitol por vía química,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 31, no. November, pp. 388-413, 2019.
- [7] Z. S. Ahmad, M. S. Abdul Munaim, “Response surface methodology based optimization of sorbitol production via solid state fermentation process,” *Eng. Agric. Environ. Food*, vol. 12, no. 2, pp. 150–154, 2019, DOI: 10.1016/j.eaef.2018.12.002. [Acceso: septiembre 24, 2021].
- [8] M. X. He *et al.*, “*Zymomonas mobilis*: A novel platform for future biorefineries,” *Biotechnol. Biofuels*, vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2014, DOI: 10.1186/1754-6834-7-101.

- [Acceso: septiembre 24, 2021].
- [9] M. De Barros, M. A. P. C. Celligoi, “Synthesis of sorbitol by *Zymomonas mobilis* under high osmotic pressure,” *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 37, no. 3, pp. 324–328, 2006, DOI: 10.1590/S1517-83822006000300023. [Acceso: septiembre 24, 2021].
- [10] F. Xu, J. Yu, T. Tesso, F. Dowell, D. Wang, “Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review,” *Applied Energy*, vol. 104. Elsevier Ltd, pp. 801–809, Apr. 01, 2013, DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.12.019. [Acceso: septiembre 23, 2021].
- [11] W. Cortes, “Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos,” *Rev. Tecnol.*, vol. 13, pp. 39–44, 2015, [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041572> [Acceso: septiembre 23, 2021].
- [12] M. I. Romero P., *Hidrólisis ácida y enzimática del residuo de poda de olivo. Fermentación de Hidrolizados con Pachysolen Tannophilus*, tesis doct. Facultad de ciencias experimentales, Universidad de Jaén, Jaén, España, 2003.
- [13] Fenalfique, "Cartilla Técnica del Cultivo de Fique" Colombia, 2019. [PDF]. Disponible: <https://www.fenalfique.com/wp-content/uploads/2019/06/cartilla-fique-2019.pdf> Acceso: sep,15,2021.
- [14] B. D. Ribeiro, D. S. Alviano, D. W. Barreto, M. A. Z. Coelho, “Functional properties of saponins from sisal (*Agave sisalana*) and juá (*Ziziphus joazeiro*): Critical micellar concentration, antioxidant and antimicrobial activities,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 436, pp. 736–743, 2013, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.08.007. [Acceso: agosto 31, 2021].
- [15] D. Bazile, D. Bertero y C. Nieto. *State of the Art Report of Quinoa in the World in 2013*. FAO, 2014.
- [16] M. A. Velásquez Flórez, Y. Vélez Salazar, “Conceptual Design or a Plant of Extraction of Saponins Presents in the Fique’s Juice,” *Rev. Ing.*, vol. 25, no. 1, pp. 50–67, 2020, DOI:

- <https://doi.org/10.14483/23448393.15298>. [Acceso: octubre 30, 2021].
- [17] L. Castro, C. Guzmán, H. Escalante, “Estabilización del bagazo de fique: Digestion anaerobia de una biomasa lignocelulosica en Colombia,” pp. 1–33, 2014, [En línea].
Disponibile:
https://www.researchgate.net/publication/295704743_ESTABILIZACION_DEL_BAGAZO_DE_FIQUE_DIGESTION_ANAEROBIA_DE_UNA_BIOMASA_LIGNOCELULOSICA_EN_COLOMBIA.
- [18] J. M. Rumaldo Torres, *Producción de sorbitol a partir de cáscara de papaya (Carica papaya) por fermentación sumergida*, tesis pre. Facultad de industrias alimentarias, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú, 2003.
- [19] H. Escalante H., C. Guzmán L., L. Castro M., “Anaerobic Digestion of Fique Bagasse: an Energy Alternative,” *Dyna*, vol. 81, no. 183, pp. 78–85, 2014, DOI: 10.15446/dyna.v81n183.34382. [Acceso: septiembre 2, 2021].
- [20] H. K. Goering, P. J. Van Soest, “Forage fiber analyses”, *U.S. Dep. Agric.*, no. 379, pp. 387–598, 1975, URL: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT87209099/PDF> [Acceso: noviembre, 30, 2021].
- [21] American Public Health Association APHA., “Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.”, [En línea].
<https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882> [Acceso: noviembre 30, 2021].
- [22] H. Escalante, L. Castro, P. Gauthier-Maradei, R. Rodríguez De La Vega, “Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 219, pp. 80–90, Nov. 2016, DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2016.06.136. [Acceso: septiembre 2, 2021].
- [23] J. C. Ochoa Botero, *Uso de licor de plantas agavaceas como aditivo en morteros y hormigones*, tesis doct, Universitat politecnica de Valencia, Valencia, España, 2009.
- [24] M. E. Ramirez Carmona, O. Vasco Echeverrias, Y. Vélez Salazar, G. R. María,

- “Producción de bioetanol empleando fermentación tradicional y extractiva a partir de jugo de fique,” *Hechos Microbiol.*, vol. 4, no. 2, pp. 91–07, 2013, URL: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/hm/article/view/21090/17607> [Acceso: septiembre 15, 2021].
- [25] E. C. Rivera, A. C. Costa, D. I. P. Atala, F. Maugeri, M. R. W. Maciel, R. M. Filho, “Evaluation of optimization techniques for parameter estimation: Application to ethanol fermentation considering the effect of temperature” *Process Biochem.*, vol. 41, no. 7, pp. 1682–1687, Jul. 2006, DOI: 10.1016/J.PROCBIO.2006.02.009. [Acceso: noviembre 30, 2021].
- [26] C. Mesa Muñoz, J. Uribe Castrillón, *Cambios generados en los suelos por la disposición del bagazo de fique*, tesis pre. Escuela de ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia, 2009.
- [27] F. J. Martínez Solarte, Z. S. Parra Guerrero, *Evaluación in vitro del efecto del jugo de fique (*Furcraea gigantea* Vent.) fermentado con *Bacillus megaterium* M46 contra *Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary.*, tesis pre. Facultad de ingeniería agroindustrial, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, 2011.
- [28] J. M. Martinko, M. T. Madigan, y J. Parker, *Brock, biología de los microorganismos*. p. 1011, 2004.
- [29] N. Barros, I. Gomez-Orellana, S. Feijóo, R. Balsa, “The effect of soil moisture on soil microbial activity studied by microcalorimetry,” *Thermochim. Acta*, vol. 249, no. C, pp. 161–168, Jan. 1995, DOI: 10.1016/0040-6031(95)90686-X. [Acceso: agosto 31, 2021].
- [30] J. C. Motte *et al.*, “Total solids content: A key parameter of metabolic pathways in dry anaerobic digestion,” *Biotechnol. Biofuels*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, 2013, DOI: 10.1186/1754-6834-6-164. [Acceso: agosto 31, 2021].
- [31] C. Perdomo, M. Barbazán, “*Nitrógeno*” Montevideo, Uruguay, 2007. [PDF]. Disponible: <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf> Acceso: sep,1,2021.
- [32] W. H. Kampen, “Nutritional Requirements in Fermentation Processes,” *Ferment.*

- Biochem. Eng. Handb. Princ. Process Des. Equip. Third Ed.*, pp. 37–57, Jan. 2014, DOI: 10.1016/B978-1-4557-2553-3.00004-0. [Acceso: septiembre 1, 2021].
- [33] A. Sánchez, A. Gutiérrez, J. Muñoz, and C. Rivera, “Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos Bioethanol Production from agroindustrial lignocellulosic byproducts,” *Tumbaga*, vol. 5, pp. 61–91, 2010. URL: <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/58/0> [Acceso: septiembre 1, 2021].
- [34] K. Allikian, R. Edgar, R. Syed, y S. Zhang, "Fundamentals of Fermentation Media", en *Essentials in Fermentation Technology*, 2019, pp 41-84.
- [35] S. G. Karp, A. L. Woiciechowski, V. T. Soccol, C. R. Soccol, “Pretreatment strategies for delignification of sugarcane bagasse: A Review,” *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 679–689, 2013, DOI: 10.1590/S1516-89132013000400019. [Acceso: septiembre 14, 2021].
- [36] A. Duque, P. Manzanares, I. Ballesteros, y M. Ballesteros, "*Steam Explosion as Lignocellulosic Biomass Pretreatment*", en *Biomass Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*, Madrid, Spain, Elsevier Inc., 2016, pp. 349-368.
- [37] C. N. Hamelinck, G. Van Hooijdonk, A. P. C. Faaij, “Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 4, pp. 384–410, Apr. 2005, DOI: 10.1016/J.BIOMBIOE.2004.09.002. [Acceso: octubre 25, 2021].
- [38] R. Biswas, H. Uellendahl, B. K. Ahring, “Wet explosion pretreatment of sugarcane bagasse for enhanced enzymatic hydrolysis,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 104–113, Feb. 2014, DOI: 10.1016/J.BIOMBIOE.2013.11.027. [Acceso: octubre 25, 2021].
- [39] C. Cara, E. Ruiz, I. Ballesteros, M. J. Negro, E. Castro, “Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification,” *Process Biochem.*, vol. 41, no. 2, pp. 423–429, 2006, DOI: 10.1016/j.procbio.2005.07.007. [Acceso: septiembre 14, 2021].

- [40] W. H. Chen, B. L. Pen, C. T. Yu, W. S. Hwang, "Pretreatment efficiency and structural characterization of rice straw by an integrated process of dilute-acid and steam explosion for bioethanol production" *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 2916–2924, Feb. 2011, DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2010.11.052. [Acceso: noviembre 30, 2021].
- [41] M. M. Míguez Bernárdez, J. De la Montaña Miguélez, J. García Queijeiro, "HPLC determination of sugars in varieties of chestnut fruits from Galicia (Spain)," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 17, no. 1, pp. 63–67, 2004, DOI: 10.1016/S0889-1575(03)00093-0. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [42] M. Filip, M. Vlassa, V. Coman, A. Halmagyi, "Simultaneous determination of glucose, fructose, sucrose and sorbitol in the leaf and fruit peel of different apple cultivars by the HPLC-RI optimized method," *Food Chem.*, vol. 199, pp. 653–659, May 2016, DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.12.060. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [43] T. Miura, S. H. Lee, S. Inoue, T. Endo, "Combined pretreatment using ozonolysis and wet-disk milling to improve enzymatic saccharification of Japanese cedar," in *Bioresource Technology*, Dec. 2012, vol. 126, pp. 182–186, DOI: 10.1016/j.biortech.2012.09.030. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [44] T. Teramoto, Y., Tanaka, N., Lee, S., & Endo, "Pretreatment of eucalyptus wood chips for enzymatic saccharification using combined sulfuric acid-free ethanol cooking and ball milling," *Biotechnol. Bioeng.*, pp. 75–85, 2008, DOI: 10.1002/bit. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [45] H. Tan, R. Yang, W. Sun, S. Wang, "Peroxide-acetic acid pretreatment to remove bagasse lignin prior to enzymatic hydrolysis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 4, pp. 1473–1479, 2010, DOI: 10.1021/ie901529q. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [46] D. Lefebvre, V. Gabriel, Y. Vayssier, C. Fontagné-Faucher, "Simultaneous HPLC determination of sugars, organic acids and ethanol in sourdough process," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 407–414, 2002, DOI: 10.1006/fstl.2001.0859. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [47] T. R. Mota *et al.*, "Design of experiments driven optimization of alkaline pretreatment and

- saccharification for sugarcane bagasse,” *Bioresour. Technol.*, vol. 321, pp. 1–10, Feb. 2021, DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124499. [Acceso: septiembre 16, 2021].
- [48] M. L. Cazetta, M. A. P. C. Celligoi, J. B. Buzato, I. S. Scarmino, R. S. F. Da Silva, “Optimization study for sorbitol production by *Zymomonas mobilis* in sugar cane molasses,” *Process Biochem.*, vol. 40, no. 2, pp. 747–751, Feb. 2005, DOI: 10.1016/J.PROCBIO.2004.01.041. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [49] M. Zachariou, R. K. Scopes, “Glucose-fructose oxidoreductase, a new enzyme isolated from *Zymomonas mobilis* that is responsible for sorbitol production,” *J. Bacteriol.*, vol. 167, no. 3, pp. 863–869, 1986, DOI: 10.1128/jb.167.3.863-869.1986. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [50] T. Chin, Y. Okuda, M. Ikeuchi, “Sorbitol production and optimization of photosynthetic supply in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803,” *J. Biotechnol.*, vol. 276–277, pp. 25–33, Jun. 2018, DOI: 10.1016/J.JBIOTEC.2018.04.004. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [51] K. N. Jan, A. D. Tripathi, S. Singh, D. Surya, S. P. Singh, “Enhanced sorbitol production under submerged fermentation using *Lactobacillus plantarum*,” *Appl. Food Biotechnol.*, vol. 4, no. 2, pp. 85–92, 2017, DOI: 10.22037/afb.v4i2.13514. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [52] V. Ladero *et al.*, “High-level production of the low-calorie sugar sorbitol by *Lactobacillus plantarum* through metabolic engineering,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 73, no. 6, pp. 1864–1872, 2007, DOI: 10.1128/AEM.02304-06. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [53] J. A. Vignoli, M. A. C. Celligoi, R. S. F. Da Silva, M. De Barros, “The production of sorbitol by permeabilized and immobilized cells of *Z. mobilis* in sucrose,” *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 683–687, 2006, DOI: 10.1590/S1516-89132006000500020. [Acceso: septiembre 25, 2021].
- [54] A. Verardi, C. G. Lopresto, A. Blasi, S. Chakraborty, V. Calabrò, “Bioconversion of lignocellulosic biomass to bioethanol and biobutanol”, en *Lignocellul. Biomass to Liquid Biofuels*, Italia, Elsevier Inc., 2020, pp. 67–125.

- [55] OEC, "D-glucitol (sorbitol)". The Observatory of Economic Complexity, [En línea]. Disponible: <https://oec.world/en/profile/hs92/d-glucitol-sorbitol> [Acceso: oct 12, 2021]
- [56] MERCK MILLIPORE, "Sorbitol - CAS 50-70-4 - Calbiochem.", [En línea]. https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Sorbitol-CAS-50-70-4-Calbiochem,EMD_BIO-56755 [Acceso: octubre 25, 2021].
- [57] MERCK SIGMA-ALDRICH, "Sorbitol F solution.", [En línea] <https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/309532?context=product> [Acceso octubre. 25, 2021].
- [58] Minagricultura, "Cadena del fique y su agroindustria - Indicadores Noviembre 2018", [En línea]. <https://www.minagricultura.gov.co/busqueda/Paginas/results.aspx?k=fique> [Acceso: noviembre 03, 2021].
- [59] J. F. Görgens, M. Carrier, y M. P. García-Aparicio, "Biomass Conversion to Bioenergy Products", en *Managing Forest Ecosystems*, 2013, pp. 137–167.
- [60] A. C. Forero Espinel, *Revisión de los pretratamientos ácido diluido, alcalino y afex aplicados a diferentes tipos de biomásas*, tesis mast. Facultad de ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2018.
- [61] J. J. Sánchez Mora, *Evaluación del pretratamiento explosión por vapor en las características fisicoquímicas de harina de yuca y sus hidrolizados*, tesis pre. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2013.
- [62] Z. S. Ahmad, M. S. Abdul Munaim, "Response surface methodology based optimization of sorbitol production via solid state fermentation process," *Eng. Agric. Environ. Food*, vol. 12, no. 2, pp. 150–154, Apr. 2019, DOI: 10.1016/J.EAEF.2018.12.002. [Acceso: octubre 25, 2021].
- [63] Y. Takasaki, "Kinetic and equilibrium studies on d-glucose-d-fructose isomerization catalyzed by glucose isomerase from streptomyces sp.," *Agric. Biol. Chem.*, vol. 31, no. 3, pp. 309–313, 1967, DOI: 10.1080/00021369.1967.10858809. [Acceso: octubre 25, 2021].

- [64] C. A. Álvarez V, C. A. Suárez M, A. A. Ruíz C, A. Molina O, “*Modelamiento de la producción de etanol utilizando Zymomonas mobilis como microorganismo fermentativo*”, Medellín, Colombia, 2009. [PDF]. Disponible:
<http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio////eventos/siquia20130415/siquia2009pon1.pdf>
Acceso: oct,15,2021.
- [65] A. M. Figueroa and C. B. Reyes, “Fermentación de sacarosa suplementada con azúcares monoméricas,” vol. 74, pp. 1–6, 1990, [En línea]. Disponible:
<https://revistas.upr.edu/index.php/jaupr/article/viewFile/6527/5180>.
- [66] N. F. Y. Tam, Y. S. Wong, “Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal,” *Environ. Pollut.*, vol. 107, no. 1, pp. 145–151, Jan. 2000, DOI: 10.1016/S0269-7491(99)00118-9. [Acceso: octubre 28, 2021].
- [67] A. Ruiz-Marín, Y. Canedo-López, A. Narváez-García, J. C. Robles-Heredia, “Production of ethanol by *Saccharomyces cerevisiae* and *Zymomonas mobilis* coimmobilized: Proposal for the use of organic waste,” *Agrociencia*, vol. 50, no. 5, pp. 551–563, 2016, URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n5/1405-3195-agro-50-05-551.pdf> [Acceso: octubre, 28, 2021].
- [68] Cámara de Comercio de Bucaramanga, “INFORME ECONÓMICO DE SANTANDER 2020”, Bucaramanga, Colombia, 2020. [PDF]. Disponible:
<https://www.camaradirecta.com/temas/documentos%20pdf/informes%20de%20actualidad/2021/Informe%20Econ%C3%B3mico%20Santander%202020.pdf> Acceso: oct,15,2021.
- [69] Weather atlas, “Previsión meteorológica a largo plazo Valle de San José, Colombia.”, [En línea]. <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/valle-de-san-jose-pronostico-del-tiempo-extendido> [Acceso: octubre 15, 2021].
- [70] Laboratorio de Ingeniería Química UNAM, “Procesos de separación I”, [En línea]. <http://depa.fquim.unam.mx/procesos/PDF/ProcesosI.pdf> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [71] Catarina, “Capítulo 5, Proceso de secado.”, [En línea] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf [Acceso: noviembre 03, 2021].

- [72] Powdertronic, “¿Cuáles son los tipos y aplicaciones de los hornos de secado industriales?” [En línea]. <https://powdertronic.com/cuales-son-los-tipos-y-aplicaciones-de-los-hornos-de-secado-industriales/> [Acceso: noviembre 03, 2021].
- [73] INGEOMINAS, “*Manual De Operación De La Unidad De Molienda Y Clasificación De La Planta Piloto Para El Procesamiento De Minerales Ubicada En Corcalí*”, Santiago de Cali, Colombia, 2001. [PDF]. Disponible: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B6/14017000022905/documento/pdf/0101229051104000.pdf> Acceso: nov,3,2021.
- [74] P. A. Jorge Montalvo, L. Flores del Pino, L. Visitación Figueroa, R. A. Naveda Rengifo, “Remoción De Lignina En El Pretratamiento De Cascarilla De Arroz Por Explosión Con Vapor,” *Rev. la Soc. Química del Perú*, vol. 85, no. 3, pp. 352–361, 2019, DOI: 10.37761/rsqp.v85i3.245. [Acceso: noviembre 3, 2021].
- [75] Procefil, “Filtración molecular.” [En línea]. <https://procefil.com/filtracion-molecular/> [Acceso: noviembre 04, 2021].
- [76] A. Gonzalez Quiroga, A. C. Costa, R. Maciel Filho, “Modelamiento Y Simulación De Una Serie De CSTR’S Con Alimentación Distribuida Para La Hidrólisis Enzimática De Bagazo De Caña,” *ION*, vol. 23, no. 1, pp. 13–19, 2010, [URL]: <https://www.redalyc.org/pdf/3420/342030281002.pdf> [Acceso: noviembre 4, 2021].
- [77] E. Papadakis, S. Pedersen, A. K. Tula, M. Fedorova, J. M. Woodley, R. Gani, “Model-based design and analysis of glucose isomerization process operation,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 98, pp. 128–142, Mar. 2017, DOI: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2016.12.016. [Acceso: noviembre 4, 2021].
- [78] Inamuddin, M. Luqman, *Ion exchange technology I: Theory and materials*, 1a. ed., Springer., 2012.
- [79] V. Y. Guillén, *Modelado de la Fermentación de Hidrolizados de Bagazo de Caña de Azúcar por S. Cerevisae para la Producción de Bioetanol en un Biorreactor Minifors*, tesis pre. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2014.

- [80] L. E. Ayala Padilla, J. A. Pabón Beltrán, F. Correa-mahecha, “Una mirada a la evaporación como operación en la industria química,” vol. 13, no. 1, pp. 1–19, 2019, DOI: <https://doi.org/10.29097/23461098.304> [Acceso: noviembre 3, 2021].
- [81] IPB II Ingeniería de procesos biotecnológicos, “Equipos cristalizadores”, [En línea]. <https://cursolusegil.blogs.upv.es/2020/04/06/equipos-cristalizadores/> [Acceso: noviembre 03, 2021].
- [82] Screenerking, “Complete Screener Units.”, [En línea]. <https://www.screenerking.com/collections/complete-screener-units> [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [83] Alibaba, “Centrífuga industrial.”, [En línea]. https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=Centrifuga+industrial&isGalleryList=G [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [84] Mixerdirect, “Chemical Mixing Tanks.”, [En línea]. <https://www.mixerdirect.com/collections/tanks-vessels> [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [85] Alibaba, “Horno de secado industrial.”, [En línea]. https://spanish.alibaba.com/products/Horno_de_secado_industrial.html?IndexArea=product_en&viewtype=G&clusterId=6500007759 [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [86] Alibaba, “Molinos de martillos industrial.”, [En línea]. https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=molinos+de+martillos+industrial&viewtype=G&tab= [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [87] Alibaba, “Filtros industriales.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/Filter-Industrial-Self-Cleaning-Filter-Auto_1600207865880.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.725f1db8TSapE3&s=p [Acceso: noviembre 05, 2021].
- [88] Alibaba, “Reactores.”, [En línea]. <https://www.alibaba.com/product-detail/Reactor-Chemical-Reactor-Prices-6000L->

- Stainless_60727846650.html?spm=a2700.7724857.topad_creative.d_title.246c1dc5lh7jxj
[Acceso: noviembre 01, 2021].
- [89] Alibaba, “Cristalizador industrial.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/Crystallizer-Reactor-Price-System-Stability-Industry_1600156194589.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.4a7f3d22kIPJK&s=p [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [90] Alibaba, “Evaporador industrial.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/industrial-heat-exchanger-condenser-evaporator-specification_62188301581.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.a5192de0UajWcD [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [91] Alibaba, “Divisor industrial.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Flow-High-Quality-Industrial-Cold_1600367864876.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7fd53e44S5XooN&s=p [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [92] Alibaba, “Filtro molecular.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/Flow-5-Cubics-304-Stainless-Steel_1600284849649.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.275777b1f2PVwA&s=p [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [93] Alibaba, “Turbina de vapor.”, [En línea]. https://www.alibaba.com/product-detail/Steam-turbine-generator-for-Industrial-Electricity_60824953476.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.45bd7e06Qa3UIU [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [94] Alibaba, “Columna de intercambio iónico.”, [En línea]. https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=Columna+de+intercambio+ionico&isGalleryList=G [Acceso: noviembre 01, 2021].
- [95] Leyes.co, “Código Sustantivo del Trabajo Artículo 168. Tasas y liquidacion de recargos.”, [En línea]. https://leyes.co/codigo_sustantivo_del_trabajo/168.htm [Acceso: octubre 20, 2021].

- [96] Talent, “Salario medio para Laboratorista en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Laboratorista> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [97] Talent, “Salario medio para Ingeniero Quimico en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Ingeniero+Quimico> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [98] Talent, “Salario medio para Ingeniero De Produccion en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Ingeniero+De+Produccion> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [99] Talent, “Salario medio para Tecnicos De Mantenimiento en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Tecnicos+De+mantenimiento> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [100] Talent, “Salario medio para Operarios De Producción en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Operarios+De+Producción> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [101] Talent, “Salario medio para Asistentes De Producción en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Asistentes+De+Producción> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [102] Talent, “Salario medio para Gerente General en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Gerente+General> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [103] Talent, “Salario medio para Secretaria en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Secretaria> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [104] Talent, “Salario medio para Gerente De Ingenieria en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Gerente+De+Ingenieria> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [105] Talent, “Salario medio para Gerente De Ventas en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Gerente+De+Ventas> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [106] Talent, “Salario medio para Administrador en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Administrador> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [107] Talent, “Salario medio para Contador en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=contador> [Acceso: octubre 26, 2021].

- [108] Talent, “Salario medio para Ingeniero Industrial en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Ingeniero+Industrial> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [109] Talent, “Salario medio para Gerente De Produccion en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Gerente+De+Produccion> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [110] Talent, “Salario medio para Director De Recursos Humanos en Colombia 2021.”, [En línea]. <https://co.talent.com/salary?job=Director+de+recursos+humanos> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [111] Talent, “Salario medio para Abogado en Colombia 2021.”, [En línea].
<https://co.talent.com/salary?job=Abogado> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [112] Talent, “Salario medio para Jefe De Investigacion Y Desarrollo en Colombia 2021.”, [En línea]. <https://co.talent.com/salary?job=Jefe+de+investigacion+y+desarrollo> [Acceso: octubre 26, 2021].
- [113] Merck Sigma Aldrich, “Sulfuric acid.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/substance/sulfuricacid98087664939?context=product> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [114] ATCC, “Zymomonas mobilis (Lindner) Kluyver and van Niel.”, [En línea].
<https://www.atcc.org/products/31821> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [115] Merck Sigma Aldrich, “Cellulase from Trichoderma reesei.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/c2730> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [116] Merck Sigma Aldrich, “Glucose Isomerase from Streptomyces murinus.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/g4166> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [117] Merck Sigma Aldrich, “Yeast Extract.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/y1625> [Acceso: noviembre 02, 2021].

- [118] Merck Sigma Aldrich, “Peptone special.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sial/68971> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [119] Merck Sigma Aldrich, “Ammonium sulfate.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/substance/ammoniumsulfate132147783202?context=product> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [120] Merck Sigma Aldrich, “Magnesium sulfate.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/m2643?context=product> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [121] Merck Sigma Aldrich, “Potassium phosphate monobasic.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/product/sigma/p5655?context=product> [Acceso: noviembre 02, 2021].
- [122] Merck Sigma Aldrich, “Sodium hydroxide.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/search/naoh?focus=products&page=1&perPage=30&sort=relevance&term=NaOH&type=product> [Acceso: noviembre 05, 2021].
- [123] Merck Sigma Aldrich, “Alginic acid sodium salt from brown algae.”, [En línea].
<https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/substance/alginicacidsodiumsaltfrombrownalgae123459005383?context=product> [Acceso: noviembre 06, 2021].
- [124] W. Cortes Ortiz, “Materiales Lignocelulosicos Como Fuente De Biocombustibles Y Productos Químicos, Lignocellulosic Materials As Source of Biofuels and Chemical Products”, [En línea]. <https://es.scribd.com/document/408543377/Materiales-Lignocelulosicos> [Acceso: diciembre 03, 2021].
- [125] M. García Holgado, “Biopolímeros”, [En línea].
<https://es.scribd.com/document/412621814/BIOPOLIMEROS-QUIMICA-docx> [Acceso: diciembre 03, 2021].
- [126] RAE, “Estopa.”, [En línea]. <https://dle.rae.es/estopa?m=form> [Acceso: diciembre 03, 2021].
- [127] RAE, “Penca.”, [En línea]. <https://dle.rae.es/penca> [Acceso: diciembre 03, 2021].

- [128] Leonardo, “Los residuos en la industria.”, [En línea]. <https://www.leonardogr.com/es/blog/los-residuos-en-la-industriae> [Acceso: diciembre 03, 2021].
- [129] E. Y. Garzón González y C. E. Cotrino Badillo, “*Aplicación al control de procesos batch*”, Bogotá, Colombia, 11, jul, 2014. [PDF]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257059812015.pdf> Acceso: dic, 3, 2021.

GLOSARIO

Biomasa. “Se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura, del aserradero y de los residuos urbanos”. [124]

Biomasa lignocelulósica. “El material lignocelulósico consiste en tres tipos diferentes de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina. Debido a la composición del material lignocelulósico la hidrólisis enzimática de esta biomasa es elevadamente limitada debido a varios factores”. [124]

Biopolímeros. “Son polímeros producidos por organismos vivos; en otras palabras, son biomoléculas poliméricas. Como son polímeros, los biopolímeros contienen unidades monoméricas que se unen covalentemente para formar estructuras más grandes”. [125]

Estopa. “Parte basta o gruesa del lino o del cáñamo, que queda en el rastrillo cuando se peina y rastrilla”. [126]

Penca. “Hoja, o tallo en forma de hoja, craso o carnoso, de algunas plantas, como el nopal y la pita”. [127]

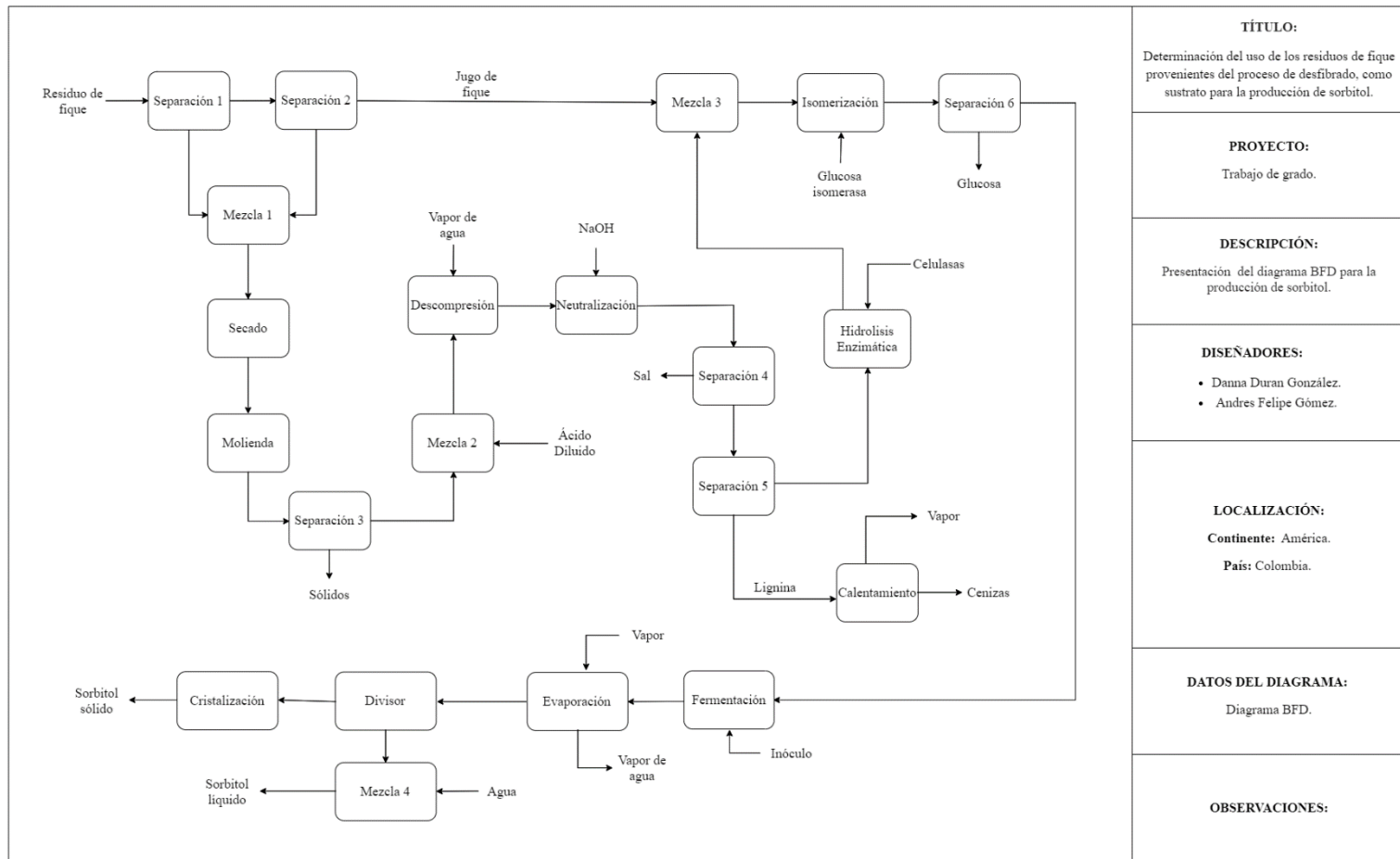
Residuos industriales. “Son aquellos que resultan de los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza o mantenimiento generados por la actividad industrial. Además, su productor tiene la obligación y la voluntad de desprenderse de ellos”. [128]

Sistemas batch. “Son aquellos sistemas de control que gestionan y ejecutan una fabricación acotada, en número de unidades o en tiempo, de un determinado producto de características predefinidas por una fórmula o especificación”. [129]

ANEXOS

ANEXO 1.

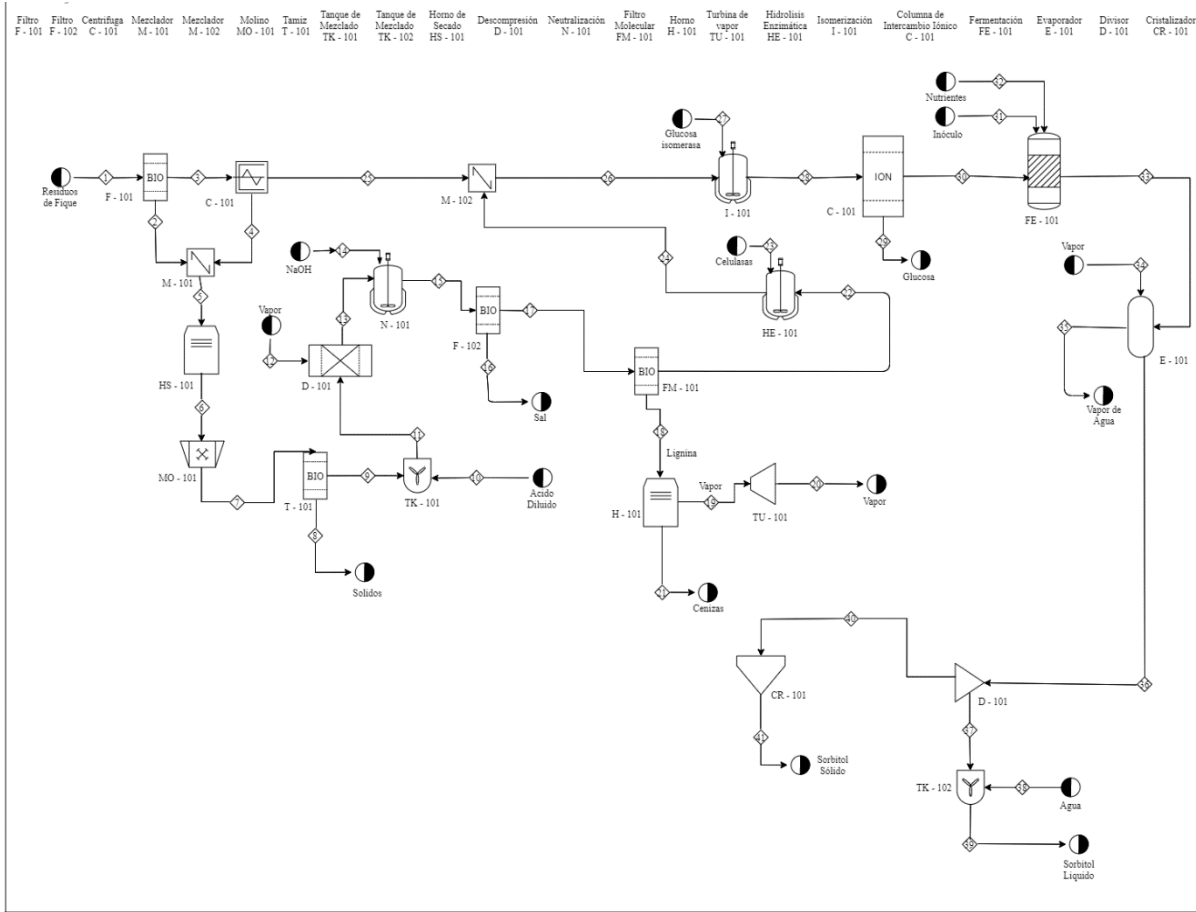
DIAGRAMA DE BLOQUES BFD PARA LA PRODUCCIÓN DE SORBITOL



Visual Paradigm Online Free Edition

ANEXO 2

DIAGRAMA PFD PARA LA PRODUCCIÓN DE SORBITOL



TÍTULO:

Determinación del uso de los residuos de fique provenientes del proceso de desfibrado, como sustrato para la producción de sorbitol.

PROYECTO:

Trabajo de grado.

DESCRIPCIÓN:

Presentación del diagrama PFD para la producción de sorbitol.

DISEÑADORES:

- Danna Duran González.
- Andres Felipe Gómez.

LOCALIZACIÓN:

Continente: América.
País: Colombia.

DATOS DEL DIAGRAMA:

Diagrama PFD.

OBSERVACIONES:

Visual Paradigm Online Free Edition

ANEXO 3

RECOMENDACIONES

Para próximos trabajos sobre el tema abordado en este proyecto se recomienda la inclusión de balances de materia, balances de energía, condiciones de operación en los diagramas en conjunto con la validación de los equipos mencionados por medio de dichos balances. Además, es recomendable determinar los rendimientos de biomasa sustrato y biomasa producto teniendo en cuenta el microorganismo *Z. mobilis* y los residuos de fique seleccionados para la obtención de sorbitol.

Por último, para la ubicación de la planta se aconseja hacer un estudio de localización en la que se analicen factores como proximidad y disponibilidad de mercado y materias primas, medio de transporte, clima, costos de servicios, y factores sociodemográficos.