

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE UN MATERIAL
PARA EMPAQUES DE CALZADO A PARTIR DE UN AGLOMERADO COMPUESTO DE
RETAZOS DE CUERO Y LIGNINA EXTRAÍDA DE HOJAS DE MAÍZ

ANGELA MARÍA GARZÓN RAMÍREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE UN
MATERIAL PARA EMPAQUES DE CALZADO A PARTIR DE UN AGLOMERADO
COMPUESTO DE RETAZOS DE CUERO Y LIGNINA EXTRAÍDA DE HOJAS DE
MAÍZ

ANGELA MARÍA GARZÓN RAMÍREZ

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director:
Ingeniero Químico
JUAN CAMILO ZÁRATE MORENO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

Nota de aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado 1
Ing. Angie Ortega

Bogotá D.C., Noviembre de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. Julio Cesar Cifuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Mecánica

Dr. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

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 a los autores.

*“Un buen padre es una fuente de
inspiración y autocontrol. Una buena
madre es la raíz de la bondad y
la humildad.”*

-Dr. T.P. Chía

*A mis padres por su inagotable esfuerzo,
sus bellas enseñanzas, su paciencia
infinita y su amor incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

Gracias *DIOS* y gracias *MARÍA AUXILIADORA* por el don de la vida y la salud, los cuales me han permitido solventar cada situación del día a día. Gracias les doy por darme el privilegio de recibir una educación digna y de calidad para continuar creciendo a nivel personal y profesional.

PÁ, MÁ no me alcanzan las palabras para agradecer todo lo que a diario hacen por mí, quiero que sepan que valoro cada esfuerzo que realizan para ir al trabajo, para levantarse temprano a alistar el almuercito, para trasnochar, para realizar toda una travesía para recogerme cuando salía tarde de algunas clases, todo por verme feliz. A ustedes les debo mi paso por la universidad, de modo que pido que desde un futuro cercano la vida me permita comenzar a recompensar todas las cosas que desinteresadamente me han brindado. Esto es por y para ustedes, los amo con mi corazón.

Agradezco a mi *FAMILIA* por estar siempre y por alegrarse con mis triunfos y un especial agradecimiento a mi otra mitad, *BEBÉ* tu ayuda fue invaluable en todos los sentidos, desde tus palabras de ánimo hasta tus trasnochadas por ayudarme con el trabajo, lo soñamos muchas veces y ahora estoy más cerca. Los amo infinito.

A la *VIDA* por cruzar en mi camino personas maravillosas que dejaron huella a lo largo de este proceso, maestros y compañeros en especial mis nanoamigas a quienes recordaré con mi corazón esperando encontrarnos más adelante como colegas.

Agradezco a la institución del Servicio Nacional de Aprendizaje-*SENA* por apoyar en el desarrollo de este proyecto de grado, mediante el préstamo de sus equipos e instalaciones y de igual manera por la atención y la colaboración de todas las personas del centro.

A la doctora *SONIA ENCISO MOSQUERA*, subdirectora del centro de manufactura en textil y cuero del *SENA*, quien muy amablemente me abrió las puertas de la institución para llevar a cabo este proyecto, sin ella esto no hubiese sido posible.

Al *Ing. JUAN CAMILO ZÁRATE* director de este trabajo de grado, por su apoyo intelectual, su paciencia y compromiso durante todo el tiempo de realización. Gracias por las ideas, los errores y las sugerencias, porque también aprendí de ellas.

Agradezco el tiempo compartido y las experiencias vividas con el *GRUPO DE INVESTIGACIÓN SENNOVA* del centro de manufactura en textil y cuero, quienes me brindaron sus conocimientos y su amistad durante este tiempo.

CONTENIDO

	pág.
OBJETIVOS	20
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 CALZADO	22
1.1.1 Cuero	23
1.1.1.1 Composición	24
1.1.1.2 Residuos de procesos de peletizado	25
1.1.2 Producto terminado	26
1.2 EMPAQUE DE CALZADO	26
1.2.1 Embalaje	27
1.2.2 Tipos de embalaje	27
1.3 MAÍZ	28
1.3.1 Composición	29
1.3.2 Hoja de Maíz	33
1.3.3 Lignina	34
1.4 AGLOMERADO	34
2. SELECCIÓN DE PROCESOS UNITARIOS PARA LA ELABORACIÓN DE UN AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA	36
2.1 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE LIGNINA	38
2.1.1 Procesos para la adecuación del amero	39
2.1.1.1 Proceso de secado del amero	40
2.1.1.2 Planteamiento del diseño experimental para secado de hojas de maíz	41
2.1.1.3 Planteamiento de balances de materia y energía para el proceso de secado de ameros	43
2.1.1.4 Proceso de molienda de ameros	44
2.1.1.5 Planteamiento del diseño experimental para la molienda de amero	46
2.1.1.6 Planteamiento de balances de materia y energía para la molienda de ameros	48
2.1.2 Procesos de hidrólisis y extracción para la obtención de lignina	49
2.1.2.1 Proceso de pulpeo por hidrólisis alcalina para la obtención del licor negro	49
2.1.2.2 Planteamiento de balance de masa y energía para hidrólisis	49
2.1.2.3 Proceso de extracción de lignina del licor negro	50
2.1.2.4 Planteamiento de balances de masa y energía para extracción de lignina	51
2.1.2.5 Proceso de secado de lignina	51
2.2 PROCESOS PARA LA ADECUACIÓN DE LOS RETAZOS DE CUERO	53
2.1.3 Selección de los retazos de cuero	53
2.1.4 Caracterización del material	53

2.1.5	Limpieza de los retazos de cuero seleccionados	54
2.1.6	Proceso de molienda de cuero	54
2.1.7	Planteamiento de balances de masa y energía para molienda de retazos de cuero	54
2.3	PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DEL AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA	55
2.3.1	Polimerización lignina y cuero para la formación del aglomerado	56
2.3.1.1	Materiales	56
2.3.2	Procesos para la elaboración del aglomerado	57
2.3.3	Planteamiento del diseño experimental para los procesos de aglomerado	57
2.3.4	Proceso de prensado del material aglomerado obtenido	58
2.3.5	Aplicación de pruebas físico-mecánicas al nuevo material obtenido	59
2.3.5.1	Ensayo de resistencia mecánica	59
2.3.6	Planteamiento de balances de materia y energía para aglomerado	59
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	60
3.1	OBTENCIÓN DE LIGNINA	60
3.1.1	Adecuación de ameros	60
3.1.1.1	Desarrollo del diseño de experimentos para secado de ameros	60
3.1.1.2	Secado	67
3.1.1.3	Desarrollo de diseño experimental para proceso de molienda	69
3.1.1.4	Molienda	78
3.1.2	Hidrólisis y extracción para obtención de lignina	80
3.1.2.1	Pulpeo para la obtención de licor negro	80
3.1.2.2	Extracción de lignina del licor negro	85
3.1.3	Secado de lignina	87
3.2	ADECUACIÓN DE RETAZOS DE CUERO	93
3.2.1	Selección de retazos de cuero	94
3.2.2	Caracterización del material	94
3.2.3	Limpieza de los retazos de cuero seleccionados	95
3.2.4	Proceso de molienda	96
3.3	CONFORMACIÓN DEL AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA	99
3.3.1	Polimerización	99
3.3.1.1	Materiales	99
3.3.1.2	Procesos de polimerizado	100
3.3.2	Pre-secado del material aglomerado	102
3.3.3	Prensado del material	102
3.3.4	Secado del material	103
3.3.5	Aplicación de pruebas físico-mecánicas	103
3.3.6	Desarrollo del diseño experimental para los procesos de aglomerado	108
4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL PROCESO A ESCALA PILOTO	114
4.1	ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL AGLOMERADO	114

4.2 BASES DE OPERACIÓN, VARIABLES Y CRITERIOS DEL PROCESO A ESCALA PILOTO	115
4.2.3 Hidrólisis y extracción de lignina	117
4.2.5 Prensado	119
4.3 BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA	120
4.3.1 Balances de Masa	120
4.3.2 Balances de energía	123
4.4 ESCALADO DEL PROCESO PARA LA ELABORACIÓN DE UN EMPAQUE DE CALZADO	124
4.5 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PARA PROCESO A ESCALA PILOTO	126
4.5.1 Horno de secado	126
4.5.2 Molino	127
4.5.3 Reactor	128
4.5.4 Filtro	130
4.5.5 Prensa	130
5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO	132
5.1 COSTOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO	132
5.1.1 Costos administrativos	132
5.1.2 Costos de producción	133
5.1.3 Costo de un empaque elaborado con material aglomerado	134
5.2 ANÁLISIS DE COSTOS EN LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO EN LA ELABORACIÓN DE EMPAQUES	135
5.2.1 Costo de un empaque convencional	135
5.2.2 Análisis comparativo de costos de empaques	135
6. CONCLUSIONES	137
7. RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	148

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Descripción de partes de la planta de maíz	31
Tabla 2. Componentes del tallo y de las hojas de la planta de maíz	32
Tabla 3. Resultados para métodos de pretratamiento para remoción de lignina del tallo de yuca	37
Tabla 4. Tabla para toma de datos de secado para el diseño de experimentos	42
Tabla 5. Tabla para toma de datos de molienda para el diseño de experimentos	47
Tabla 6. Tabla para toma de datos de las pruebas del material aglomerado para el diseño de experimentos	58
Tabla 7. Registro de datos de secado durante el diseño de experimentos	61
Tabla 8. Análisis de varianza para pérdida de peso	65
Tabla 9. Resultado del diseño de experimentos para maximizar la pérdida de peso en el secado de ameros	67
Tabla 10. Registro de datos de la operación de secado de ameros	68
Tabla 11. Registro de datos de peso en molienda de ameros	71
Tabla 12. Registro de datos de peso y % de retención por tamiz en el diseño de experimentos de molienda	73
Tabla 13. Registro de datos de peso en el tamizado de ameros	73
Tabla 14. Registro de datos de peso en el tamiz 80 para diseño de experimentos	74
Tabla 15. Análisis de varianza para peso tamiz malla 80	76
Tabla 16. Respuesta del diseño de experimentos de secado de ameros	78
Tabla 17. Registro de datos de peso y pérdidas de material en la operación de molienda para el segundo lote de hojas secas	79
Tabla 18. Registro de datos de tamizado para el segundo lote de hojas secas	79
Tabla 19. Calculo de rendimiento del proceso de hidrólisis para cada muestra	88
Tabla 20. Peso de cada muestra para FTIR	90
Tabla 21. Longitudes de onda para grupos funcionales de lignina	92
Tabla 22. Registro de datos de molienda de cuero	97
Tabla 23. Espesor de cada muestra de material	105
Tabla 24. Registro de datos del módulo de Young para diseño de experimentos	109
Tabla 25. Análisis de varianza para módulo de Young	111
Tabla 26. Respuesta del diseño de experimentos de aglomerado	112
Tabla 27. Comparación del material obtenido con material de referencia	113
Tabla 28. Especificaciones de operaciones de secado	116
Tabla 29. Especificaciones de operaciones de molienda	117
Tabla 30. Especificaciones de operaciones de extracción de lignina	118
Tabla 31. Especificaciones de operación de mezclado para material	119
Tabla 32. Especificaciones de operación de prensado de material	120

Tabla 33. Resultados de balances de masa para fase de lignina	121
Tabla 34. Resultados de balances de masa para fase de cuero	122
Tabla 35. Resultados de balances de masa para fase de aglomerado	122
Tabla 36. Resultados del balance de energía	124
Tabla 37. Resumen de escalamiento de proceso para placa de 1mx70cm	125
Tabla 38. Costos asociados al proceso de fabricación del empaque	132
Tabla 39. Costos de producción de material	133
Tabla 40. Costos de empaques convencionales	135

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ejemplar de Maíz Sabanero	28
Figura 2. Partes de la planta de maíz	30
Figura 3. Esquema general de proceso	36
Figura 4. Diagrama general para obtención de lignina	39
Figura 5. Horno Mermert UN 240 utilizado para las operaciones de secado	40
Figura 6. Unidad de Secado para balance masa y energía	44
Figura 7. Molino Universal L60013	45
Figura 8. Complejo de mallas para tamizado de ameros	46
Figura 9. Tabla para toma de datos de molienda para el diseño de experimentos	48
Figura 10. Unidad de hidrólisis para balance de masa y energía	50
Figura 11. Diagrama de proceso para operación de extracción de lignina	51
Figura 12. Horno SDL ATLAS 110V para de secado de lignina	52
Figura 13. Unidad de secado para balances de masa y energía	52
Figura 14. Diagrama general para adecuación de cuero	53
Figura 15. Diagrama de proceso para operación de molienda de cuero	55
Figura 16. Diagrama general del proceso de aglomerado	55
Figura 17. Selección de muestras de ameros para secado	60
Figura 18. Almacenamiento de muestras según tiempo y temperaturas de secado	62
Figura 19. Secado para la muestra registrada en el punto 55.86°C con 3 horas	63
Figura 20. Muestras después del secado. a) 55,86°C; 3h. b) 70°; 1,58h. c) 70°C; 3h d) 70°C; 4,41h. e) 60°C; 2h. f) 80°C; 2h. g) 80°C; 4h. h) 84,14°C; 3h	63
Figura 21. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de secado de ameros	66
Figura 22. Distribución de muestras para secado de ameros	67
Figura 23. Disposición de las hojas de mazorca para el secado	68
Figura 24. Almacenamiento de muestras para molienda	69
Figura 25. Almacenamiento de muestras molidas para diseño de experimentos	70
Figura 26. Para la muestra 1: a) Residuos malla 10 b) Residuos malla 80 c) Residuos fondos	72
Figura 27. Pesaje para la muestra 1: a) Residuos malla 10 b) Residuos malla 80 c) Residuos fondos	72
Figura 28. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de molienda de ameros	77
Figura 29. Tamizado del segundo lote de hojas secas. Izquierda: Residuo de los fondos; Centro: Residuos del tamiz 80; Derecha: Residuos del tamiz 10	79
Figura 30. a) Pesaje de ameros. b) Pesaje de KOH. c) Preparación de NH ₄ OH al 4,38%	82
Figura 31. Mezcla con 200ml de NH ₄ OH para proceso de hidrólisis	83

Figura 32. Mezcla con 400ml de NH_4OH para proceso de hidrólisis	83
Figura 33. Mezcla después del proceso de hidrólisis	84
Figura 34. Licor negro filtrado y almacenado para extracción	84
Figura 35. Medición de pH de la primera muestra de licor negro (M1)	85
Figura 36. Precipitación de lignina con 20ml de H_2SO_4 (1N)	86
Figura 37. Torta de filtrado. a) M1 b) M13	87
Figura 38. Muestra 4 de lignina después del secado	88
Figura 39. Lignina obtenida para cada una de las 13 muestras	88
Figura 40. Muestras de lignina para FTIR	89
Figura 41. FTIR para lignina obtenida	90
Figura 42. FTIR para lignina obtenida a) Blanco b) M1	91
Figura 43. Comparativa de FTIR de lignina a) de caña de azúcar b) Ameros	93
Figura 44. Cuero recolectado del taller de corte y confección del centro de manufactura textil y cuero del SENA	94
Figura 45. Separación del cuero por grosor	95
Figura 46. Retazos de cuero seleccionados después de la limpieza	95
Figura 47. Retazos de cuero seleccionados para molienda	96
Figura 48. Cuero molido	96
Figura 49. Disolución de lignina en NaOH (4%)	100
Figura 50. Mezcla aglomerante	101
Figura 51. Mezcla del aglomerado lista para moldeo	101
Figura 52. Moldeo de la mezcla aglomerada (Muestra 1)	102
Figura 53. Placa prensada (Muestra 1)	103
Figura 54. Placa seca, lista para pruebas (Muestra 1). a) Frente b) Revés	103
Figura 55. Medición de espesor de probeta M1	104
Figura 56. M3 y M13 después de intentar cortar las probetas para pruebas	105
Figura 57. M1 lista para prueba de esfuerzo-tensión	106
Figura 58. M1 después de la prueba de esfuerzo-tensión	107
Figura 59. Probetas de aglomerado después de la prueba de esfuerzo-tensión	108
Figura 60. Valor de fuerza más alto para M1	109
Figura 61. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de material aglomerado	111
Figura 62. Propuesta de proceso para la obtención de un material compuesto de cuero y lignina	114
Figura 63. Dimensiones para horno de secado	127
Figura 64. Molino para planta piloto	128
Figura 65. Dimensionamiento del reactor CSTR	129
Figura 66. Prensa para planta piloto	131

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Registro de datos del proceso de tamizado	149
Anexo B. Espectroscopia Infrarrojo para muestras de lignina	151
Anexo C. Gráficas de esfuerzo Vs deformación para cada muestra en prueba de tensión	152
Anexo D. Balances de masa y energía de cada operación	153
Anexo E. Cálculos de escalamiento del proceso para planta piloto	162
Anexo F. Cálculos para el dimensionamiento de los equipos para planta piloto	164
Anexo H. Cálculo de indicadores económicos	166

GLOSARIO

AGLOMERADO: es un material compuesto, que reúne partículas pequeñas o polvo de una o varias sustancias mediante el uso de un aglomerante que permite que las partículas se mantengan unidas entre sí.

CUERO: es la piel de los animales que se somete a varios tratamientos de curtido para convertirse en la base de fabricación de artículos de calzado y marroquinería.

DUCTILIDAD: es una propiedad mecánica que adquiere un material para deformarse sin fracturarse al momento de ser sometido a una fuerza de tensión.

HIDRÓLISIS: es una reacción química que permite la descomposición de una sustancia orgánica. Es el método por el cual se separa la lignina de los demás componentes de la hoja de maíz.

HOJA DE MAÍZ: parte de la planta de maíz que envuelve la mazorca.

LIGNINA: polímero natural de estructura compleja que se encuentra en la pared celular de las plantas, encargado de proporcionar rigidez a la misma.

MAÍZ: es el tercer cereal más cultivado en el mundo, suministra gran cantidad de nutrientes tanto para animales como para seres humanos.

PLASTICIDAD: propiedad mecánica que adquiere un material para ser moldeado con el fin de cambiar su forma.

PROPIEDAD MECÁNICA: es una propiedad física que representa una característica o comportamiento de un material cuando se somete a una fuerza (tensión, compresión y torsión).

PRUEBA DE TENSIÓN: es un mecanismo para medir la plasticidad de un material, mediante el uso de una fuerza opuesta que aumenta gradualmente hasta que el material se fracture.

REBAJADO: operación que se usa para ajustar el espesor del cuero, realizando un raspado sobre la flora del material.

RESISTENCIA: capacidad que tiene un material para soportar un esfuerzo o una fuerza sin romperse o deformarse.

RESUMEN

De todos los sectores industriales que generan altos índices de contaminación, se seleccionó la industria agrícola y la industria del calzado y marroquinería para crear una estrategia que reduzca la producción de elementos ajenos al medio ambiente por parte de los dos sectores. Los retazos de cuero de desbaste y las hojas de maíz son los residuos que se emplearon en esta propuesta de mejora, debido a su alta tasa de producción.

La propuesta consiste en la creación de un nuevo material, compuesto por retazos de cuero unidos mediante el uso de un polímero de origen natural. El biopolímero utilizado es conocido como lignina, es uno de los más abundantes en la tierra ya que se encuentra en la pared celular de las especies vegetales y es extraído de las hojas de maíz seleccionadas.

El proceso se dividió en tres núcleos, lignina, cuero y aglomerado; los cuales permitieron un desarrollo coherente de procesos. Para la extracción de lignina se hizo un proceso de hidrólisis alcalina con NH_4OH y KOH bajo condiciones específicas de temperatura, mientras que el cuero sufrió únicamente un proceso físico de reducción de tamaño para facilitar la elaboración del material. La fase final consistió en conformar el aglomerado haciendo uso de PVA, glicerina, ácido bórico y los dos elementos obtenidos en los procesos anteriores; se hicieron un total de 16 probetas de material con diferentes composiciones, a las cuales se les realizaron pruebas de resistencia obteniendo como resultado que para una placa de 10cm x 10cm son necesarios 2,03g de lignina y 1,88g de PVA para que cumpla con las especificaciones de empaque de calzado.

Palabras Clave: Lignina, retazos de cuero, hojas de maíz, aglomerado.

INTRODUCCIÓN

El cuero ha sido por muchos años una pieza infaltable en la fabricación de calzado y artículos como bolsos, billeteras o cinturones, entre otros; inclusive desde la prehistoria, ya que desde entonces el hombre usaba la piel de los animales para cubrirse del frío. Con la evolución del hombre, vino también la industrialización de los procesos de fabricación de estos productos, y consigo las consecuencias ambientales, reflejadas en la cantidad de residuos que se generan a diario.

La industria de la curtiembre es actualmente muy cuestionada por la irregularidad de sus procesos en materia ambiental, pero a pesar de eso es una de las más influyentes en la economía de muchos países. Es por esto que desde ya se deben buscar alternativas para mitigar el impacto que genera esta industria, bien sea en la tecnificación de los procesos o en la creación de una forma de aprovechar estos residuos, y es allí donde radica la importancia de este proyecto, ya que propone una alternativa para reducir la cantidad de retazos de cuero que se vierten a los basureros, afectando de forma directa al suelo.

El aspecto más importante de la propuesta de reducción de residuos de marroquinería, es poder darle un valor agregado a los mismos mediante la elaboración de un material que reutilice los retazos de cuero que se generan en el Centro de manufactura textil y cuero (CMTC) del SENA y que además aproveche los recursos naturales que también generan residuo.

Las plantas dentro de su estructura contienen sustancias como celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otras que le proporcionan diferentes propiedades. En este proyecto, se hace uso de lignina como agente aglutinante en la elaboración del material aglomerado que será elaborado a base de los retazos de cuero, la cual se encuentra en menor proporción en las plantas no maderables, como la de maíz o la de caña de azúcar. Teniendo en cuenta que la producción de maíz está distribuida no solo a lo largo del territorio nacional sino también mundial, se hace más grande la cantidad de residuos generados, que aunque no son perjudiciales para el medio ambiente, no se están aprovechando. Lo cual se convierte en la razón principal para seleccionar al maíz como fuente de lignina; además los residuos son recolectados en un municipio productor de maíz a baja escala, lo que permite un proceso de recolección de residuos más sencillo.

La lignina es una fibra que se encarga de mantener unidos los componentes celulósicos de las plantas, es decir que, al realizar procesos de deslignificación, la planta pierde rigidez, lo cual permite trabajar mejor con dichos componentes dependiendo del uso que se le quiera dar. Un caso específico, es la producción de papel, la cual se lleva a cabo mediante varios procesos, entre ellos el proceso de pulpeo, en el cual se obtiene la pasta de celulosa necesaria para la producción de papel mediante el desprendimiento de la lignina, la cual queda suspendida en el

residuo llamado licor negro. Esta parte del proceso genera muchos residuos que resultan ser altamente contaminantes puesto que los niveles de DQO presente en el licor negro son muy altos debido a la presencia de lignina¹, es por eso que se propone una recuperación de la misma mediante un proceso de hidrólisis alcalina a base de KOH y amoníaco² a partir de las hojas de mazorca, para usarla como aglomerante.

El proceso de formación del aglomerado se hará mediante la mezcla de los dos componentes anteriores con aditivos que le proporcionarán mejores características al material, seguido de un proceso de prensado con temperatura para moldear el material y obtener una lámina delgada que funcione como base para realizar las pruebas de tensión³. Terminados los ensayos, la forma de placa delgada permitirá un mejor manejo en el diseño del empaque.

Los empaques utilizados para el almacenamiento de calzado actualmente son desechados por su baja durabilidad. La mayoría son elaborados a base de cartón, el cual es reciclado y reutilizado para otros fines, lo que permite buscar una estrategia para hacer que el material aglomerado pueda funcionar como empaque, siendo una alternativa sustentable para las dos industrias mencionadas. Una de las consideraciones para elaborar el empaque, es que tenga una composición y un diseño adecuados que lo hagan durable, con el fin de reutilizado en otras actividades y que no se quede únicamente como empaque. La forma de determinar las propiedades que obtiene el material aglomerado es mediante una prueba físico-mecánica que demostrará a lo largo del documento las características que tendrá.

Todos los procesos se encuentran descritos con mayor profundidad en el siguiente orden: obtención de lignina, acondicionamiento de los retazos de cuero y elaboración del material aglomerado. Se plantean tres diseños de experimentos en tres fases del proceso siendo el del aglomerado el más complejo y el más importante, puesto que usa para determinar la cantidad de lignina que debe llevar el material para garantizar buenas propiedades físico-mecánicas, determinadas en los ensayos de tensión.

Una vez elaborado el material y evaluadas sus propiedades, se realiza un análisis de la funcionalidad y de determina su futuro como base para empaque. Dejando de lado la fase de diseño, ya que no se encuentra dentro del desarrollo de esta propuesta.

¹ ORTÍZ, Alexandra. Tratamiento por acidificación controlada del licor negro derivado del bagazo de caña para la recuperación de lignina y reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). Maestra en eco tecnología. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 2009. p. 29

² HUANG, Guolin; SHI, Jeffrey X. y LANGRISH, Tim A. A new pulping process for wheat straw to reduce problems with the discharge of black liquor. En: Bioresource Technology. China. 2006. 98.

³ ARIAS F. Alejandro J. Estudio de materiales compuestos de cuero recuperado aglomerados con resina polimérica. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. 2013. p. 2

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la elaboración de un material para empaques de calzado a partir de un aglomerado compuesto de retazos de cuero y lignina extraída de hojas de maíz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los procesos unitarios para la obtención de un aglomerado de cuero y lignina para una posible aplicación en empaques para calzado.
- Obtener un aglomerado que cumpla con las propiedades físico-mecánicas propias para un empaque de calzado según las normas ASTM correspondientes a películas delgadas.
- Determinar las especificaciones técnicas para la elaboración del material para empaques de calzado a escala piloto.
- Realizar el análisis de costos de la elaboración de un aglomerado con cuero y lignina a escala piloto.

1. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de esta propuesta, está basado en la reutilización de residuos provenientes de dos sectores importantes de la industria, con los cuales se busca obtener un material con características específicas para una posible aplicación en empaques, siendo esta una manera de reducir la cantidad de residuos que se emiten a los ecosistemas, teniendo en cuenta que estos representan una porción significativa del total que deja la cadena productiva en general.

El Centro de Manufactura Textil y Cuero (CMTC) del SENA es el lugar donde se lleva a cabo el desarrollo de este proyecto, por lo tanto, es allí donde se permite identificar la cantidad y los tipos de residuos que se obtienen de las actividades relacionadas con la industria de la moda, para así definir el primer sector de la industria con el que se va a trabajar, teniendo en cuenta también el impacto que estos generan al medio ambiente. Como las operaciones que se llevan a cabo allí comprenden corte y confección para elaboración de prendas de vestir y calzado, se identifican entonces retazos de textiles, fibras, cuero, entre otros materiales; dentro de los residuos, siendo los retazos de cuero el principal, el más abundante y el más contaminante de todos los que se producen en este centro, lo que permite seleccionar el sector de calzado como la primera industria involucrada en este proyecto.

Por otro lado, para el desarrollo de la idea se requiere que la industria seleccionada proporcione grandes cantidades de residuos, de modo que se identifica otra fuente importante como lo es la agroindustria, ya que la producción de alimentos genera un alto impacto al medio ambiente, no solo por las cantidades de residuos sólidos, sino también por la afectación a fuentes hídricas cercanas. Dentro de los cultivos con mayor cantidad de materia orgánica de desecho, se encuentran cereales como trigo, arroz y maíz, este residuo se recauda en tiempo de cosecha y comercialización del producto. El maíz, es el cereal que está más al alcance y de los tres anteriormente mencionados, es el que más residuos orgánicos genera, los cuales suelen ser diversos. Por facilidad de recolección se elige la hoja de mazorca de maíz amarillo como residuos del segundo sector involucrado en este proyecto, el cual será empleado para obtener una sustancia polimerizante denominada lignina.

Este primer capítulo, es una descripción de los términos relevantes para la investigación, los cuales permitirán una mejor comprensión de los procesos que se desarrollan durante el proyecto. A modo introductorio se describe el funcionamiento de la industria de calzado en Colombia, la importancia del uso de cuero como materia prima y por otro lado se habla de la importancia que tiene la lignina en este proyecto y su forma de obtención, estableciendo la relación que tendría el cuero y la lignina en la elaboración del aglomerado, término que también se encuentra descrito en este apartado.

1.1 CALZADO

Dentro de las ventajas del sector del calzado en cuero, se encuentran algunas en cuanto al nivel de consumo, debido a que desde hace varios años el calzado se ha convertido en una pieza infaltable para la mayoría de la población bien sea por necesidad o por moda, pero ninguna se ha preguntado por lo que hay detrás de esta industria. Es por esto que la primera parte de este documento se centra en describir el impacto sobre el medio ambiente la elaboración de calzado, específicamente calzado de cuero.

Según un estudio elaborado por el Instituto Tecnológico del Calzado, denominado "CO₂Shoe", la elaboración de un par de zapatos genera desde 1,3 hasta 23,3Kg de CO₂, según el tipo de calzado. Estas cifras de emisión de CO₂ están distribuidas de la siguiente manera: el 58% corresponde a la fabricación del cuero, plantilla, lengüeta, etc.; el 16% corresponde al empaque de fabricación; el 11% a los procesos de montaje y acabado; y el 6% es causado en los procesos de transporte para la distribución del proceso terminado⁴.

A partir del estudio anteriormente mencionado, se puede concluir que la elaboración de calzado en cuero es una de las actividades más contaminantes de la industria, por consiguiente, el impacto negativo que genera sobre el medio ambiente se hace más significativo con el paso del tiempo, no solo por la producción de CO₂, como lo indica el estudio, sino también porque durante la fase de confección se producen residuos de limpieza y mantenimiento de equipos o materias primas y por supuesto residuos sólidos que terminan en los basureros contaminando los suelos⁵.

La reducción del impacto generado por la industria de calzado puede ser factible inicialmente desde el manejo de residuos, por eso se plantea una iniciativa que permita reutilizar parte de los retazos de cuero que actualmente son basura, para la elaboración de un material que se adecue a los requerimientos de diseño de un empaque para el mismo calzado que inicialmente generó estos residuos, haciendo de este un proceso autosuficiente.

Para el desarrollo de dicho empaque, es necesario evaluar al cuero como una de las materias primas fundamentales para el proceso de la manufactura de calzado, por tal motivo, a continuación se define al cuero como elemento estructural en la cadena productiva en estudio.

⁴ ECOGESTOS. La industria del calzado y su impacto ambiental. Disponible en: <https://www.ecogestos.com/la-industria-del-calzado-y-su-impacto-ambiental/>

⁵ PACHECO B., Bélgica; COLLADO R., Daniel y CAPUZ R., Salvador. Identification of impacts of stages and materials on life cycle of footwear. En: DYNA. Medellín. 2014.

1.1.1 Cuero. Para comprender mejor la intención de aprovechamiento de residuos sólidos que se plantea, es necesario identificar el material partiendo desde su origen, concepto y composición para poder comprender la función que cumple dentro del proceso de manufactura de calzado.

La piel de los animales ha sido ampliamente utilizada en la elaboración de artículos que han ayudado al ser humano a suplir algunas necesidades a lo largo de la historia. Las pieles más comunes proceden del ganado bovino, pero también se utilizan las de los caprinos, porcinos, equinos y de animales como la nutria, la chinchilla o algunos reptiles⁶; las cuales son transformadas por una serie de procesos para obtener el cuero.

Según el diccionario de la lengua española⁷, etimológicamente el cuero se define como: *“La palabra cuero proviene del latín curium (piel de los animales, curtida), es decir se trata de la piel tratada mediante curtido.”*

El cuero proviene de un proceso de curtido, el cual se realiza para evitar la descomposición de la piel, ya que al estar compuesta por tejidos orgánicos se expone a sufrir alteraciones al entrar en contacto con el medio ambiente, dicho esto, se dice que el proceso de curtido es:

“El proceso de transformación de pieles de animales en cuero, como resultado de la estabilización de las fibras de colágeno de la piel con agentes curtientes, mediante la formación de complejos tipo quelatos”⁸.

El procedimiento mencionado se lleva a cabo en cuatro etapas: ribera, curtido, acabado húmedo y acabado en seco; durante las cuales se hace la limpieza de la piel, se aplica el tratamiento químico a base de sales metálicas que se fijan en las fibras de colágeno para evitar la descomposición y finalmente se realizan los acabados para que el cuero adopte ciertas características de acuerdo a los requerimientos que deba tener el material según para lo que vaya a ser usado, afirmación que es constatada por la secretaria distrital del ambiente.

Los retazos de cuero que se obtienen al final de la producción de calzado suelen ser de distintos tipos, estos difieren en su composición según las variaciones hechas al procedimiento de curtido al que hayan sido sometidos.

⁶ ABC COLORS. El cuero, características y utilización. 2008. Disponible en: <http://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/el-cuero-caracteristica-y-utilizacion-1119866.html>

⁷ DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA ESPAÑOLA DE LA LENGUA. Edición 2014. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=Ba1PkBQ>

⁸ SECRETARIA DISTRITAL DEL AMBIENTE. Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá Enfoque en vertimientos y residuos. Bogotá D.C. 2014.

1.1.1.1 Composición. La perfección de los acabados en el cuero, no solo depende del procedimiento y los materiales que se usen dentro del mismo, sino también de la calidad de la piel de donde se obtiene. La calidad de la piel, se debe a su composición y a los procesos que se hacen para retirarla del animal sin dañarla.

La piel como el órgano más grande que poseen los seres vivos a lo largo de su cuerpo, siendo el primer receptor de las sustancias del entorno y se encuentra dividida en tres capas: epidermis, dermis e hipodermis, las cuales a su vez están subdivididas en varias subcapas⁹. Químicamente la piel está compuesta por: Agua (64%), proteínas como elastina, colágeno, queratina, entre otras (33%), grasa (2%), sales minerales (0,5%) y otras sustancias (0,5%)¹⁰.

Una vez que la piel sufre la transformación fisicoquímica en el proceso de curtido, su composición dependiendo del tipo de tratamiento al que se somete, además de que los restos de carne y capas de piel son eliminadas en la primera etapa de ribera, siendo esta una forma de reducir las características que tenía inicialmente y variar también el tipo de cuero que se obtiene.

Todos los tipos de cuero se derivan de procesos de curtido similares, pero las variaciones en estos son los que permiten obtener acabados diferentes. A continuación se describen las técnicas más empleadas según un artículo de abc color¹¹:

- **Cuero crudo:** Sufre el mismo proceso de descarnado inicial, pero no tiene tratamiento químico de ningún tipo, de modo que su contenido no difiere ampliamente de la piel del animal.
- **Cuero curtido con sesos:** Además de los componentes ya mencionados, contiene aceites emulsionados extraídos del cerebro de los animales para obtener gamuza.
- **Cuero de curtido vegetal:** Su composición varía con respecto a los demás porque contiene taninos que permiten dar un acabado suave al cuero con un color café final.
- **Cuero curtido al aluminio:** Es un cuero que contiene una sal de aluminio llamada alumbre, la cual se adiciona con el fin de obtener un cuero muy blanco.
- **Cuero curtido al cromo:** En éste se produce un cuero que contiene sales y ácidos de cromo con el fin de obtener un cuero de excelente calidad.

De los procesos anteriormente descritos, el que trabaja con compuestos de cromo es el más utilizado debido a que genera un curtido más uniforme y rápido y además se obtiene un material con una superficie mayor que la se obtiene en los otros, pero

⁹ NAVARRETE F., Gisela. Histología de la piel. *En:* Fac Med UNAM. Vol. 46. No. 4. 2003. p. 130.

¹⁰ VALLEJO, Sonia. Composición química de la piel. 2018. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/226656923/Composicion-Quimica-de-La-Piel>

¹¹ ABC COLOR. Op. cit., disponible en: <http://www.abc.com.py/edicion-impresas/suplementos/escolar/el-cuero-caracteristica-y-utilizacion-1119866.html>

tiene un inconveniente y es que también es un generador potencial de residuos altamente contaminantes que se dirigen hacia cuerpos de agua o que en su defecto se quedan en los lodos de depuración producto del proceso de curtido, evitando así la posibilidad de reutilizarlos en otras unidades por la presencia del cromo hexavalente y trivalente¹².

El cuero obtenido como residuo en los procesos de manufactura de calzado podrá ser reutilizado para formar nuevos materiales que sirvan como alternativa para otras industrias. Este proceso de reutilización de los retazos se describe a continuación.

1.1.1.1 Residuos de procesos de peletizado. Un proceso de peletizado consiste en la elaboración de un nuevo material en forma de gránulos a partir de materiales reciclados, el procedimiento consiste en transformar el material mediante una serie de procesos de molienda, lavado y peletizado, en donde se funde el material y se lleva a través de un tubo delgado que le proporciona la forma de pellet, el cual es sometido a cambios bruscos de temperatura para lograr un material duro¹³. El proceso es llevado a cabo en una maquina peletizadora y se considera altamente costoso debido a la cantidad de transformaciones que sufre el material, esto según lo dicho por Malma¹⁴.

Este procedimiento se realiza con el fin de que los gránulos de material reciclado y peletizado se conviertan en materia prima de otros procesos industriales, como aglomerados. Para el caso particular de este proyecto, se propone la elaboración de un material aglomerado a partir de residuos de cuero que sufrirán un proceso de rebajado, los cuales salen en pellets de diferentes tamaños.

La reutilización de los residuos de cuero para la elaboración de un nuevo material puede realizarse con diferentes materias primas; las más comunes son los plásticos, entre los que se encuentran el poliuretano, el polietileno de alta y baja densidad, el polipropileno, entre muchos otros¹⁵; también se realizan este tipo de procedimientos para peletizado de alimentos para animales en donde se obtiene el concentrado a partir de la transformación de harinas previamente procesadas¹⁶.

En conclusión un proceso de peletizado es transformar un residuo en materia prima para otros procesos, lo cual se asimila al objetivo principal de este proyecto, ya que

¹² CHÁVEZ P., Álvaro. Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Medellín. Vol. 9. No. 17. 2010. p. 41-50.

¹³ MALMA, Antonio. Peletizado de polímeros. [Diapositivas]. Perú. SlideShare. 2013. 15 diapositivas, color.

¹⁴ Ibid., p. 10.

¹⁵ Ibid., p. 13.

¹⁶ ISMAIL, Omar. Entender el proceso de peletizado para lograr mejores resultados. 2008. Disponible en: <https://www.industriaavicola.net/nutricion-y-fabricacion-de-alimentos-balanceados/entender-el-proceso-de-peletizado-para-lograr-mejores-resultados/>

se busca convertir los desechos de la elaboración de calzado en la base de un nuevo material para el diseño de un empaque.

1.1.2 Producto terminado. El cuero transformado será ahora la materia prima de interés, teniendo en cuenta que es usada para la fabricación de calzado. Este sector ha sido ampliamente influyente en la industria a nivel mundial, por la alta producción de artículos como botas, sandalias, zapatos, entre otros elementos, en grandes cantidades y en diferentes materiales como cuero, goma y actualmente en materiales sintéticos que le proporcionan las mismas características en apariencia pero no en términos de calidad. Los procesos para elaboración de calzado no se han industrializado del todo, puesto que aún los zapatos de las grandes marcas reconocidas son hechos a mano de manera parcial o total¹⁷.

La distribución del producto terminado, es el final de la cadena productiva del calzado, el cual involucra los procesos de empaquetado y comercialización. Los zapatos deberán estar envueltos en una tela que los separe y proteja del contacto con la caja, generalmente de cartón¹⁸, lo que se convierte en otro factor que afecta directamente al medio ambiente, por estar elaborados a base de materiales que se convierten en basura rápidamente. Por tal motivo se plantea la posibilidad de usar el material aglomerado que se va a obtener de este proyecto como base para elaborar empaques de calzado, con el fin de darle un valor agregado a los residuos, reduciendo así el impacto generado por esta industria. Siendo así, a continuación se describe el concepto de empaque, estableciendo la importancia que este tiene dentro del proceso productivo del calzado.

1.2 EMPAQUE DE CALZADO

Existen tanto empaques como embalajes de producto, dependiendo del tipo y forma de distribución, teniendo en cuenta que su único fin deberá ser resguardar el producto en buen estado hasta que llegue al cliente. Un empaque es la envoltura que está en contacto directo con el producto, por tal motivo, el material utilizado para la elaboración del empaque debe cumplir con ciertas características que lo hagan llamativo para el cliente como estrategia de marketing, pero además deberá ser práctico para almacenar y transportar¹⁹.

En empaques se conocen tres tipos según sus características: el empaque primario, es el que contiene al producto; el empaque secundario, es aquel que contiene al empaque primario y puede servir como medio de protección o como presentación del producto; y el empaque terciario, que es el que puede contener tanto empaques

¹⁷ MCCANN, Michael. Cuero, pieles y calzado. En: JEAN MAGER. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Ginebra. Chantal Dufresne, BA. 1998. p. 88.2.

¹⁸ PACHECO B., Bélgica; COLLADO R., Daniel y CAPUZ R., Salvador. Op. cit., p. 136.

¹⁹ RICO A., David y VILLAMIZAR, Maritza. Empaques y embalajes para exportación. 2015. Disponible en: http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/file.php/424/Envases_y_Empaques/Seminario_de_Empaques_y_embalajes_para_exportacion.pdf

primarios como secundarios y está para facilitar la manipulación y el transporte del producto. Estos empaques pueden ser de papel, cartón corrugado, plástico, metal, vidrio, madera, material textil o de materiales compuestos²⁰. Según lo mencionado anteriormente, se concluye que lo que se va a realizar con el material aglomerado es el embalaje para la distribución del calzado elaborado en el SENA.

1.2.1 Embalaje. A diferencia del empaque, el embalaje no tiene contacto directo con el producto, pero si tiene como objetivo proteger sus características y garantizar la calidad del mismo durante su distribución; de modo que, el embalaje es el medio material destinado a la protección de la mercancía que transporta durante los procesos de carga, manipulación o bien sea para almacenamiento en depósitos o almacenes²¹.

Como en los empaques, para los embalajes también existe una clasificación dependiendo el producto, el material, entre otras características que a continuación se describen.

1.2.2 Tipos de embalaje. El embalaje garantiza la calidad del producto que contiene, pero el método que cada proveedor elija para cumplir este objetivo dependerá del tipo de producto, la cantidad o el procedimiento de carga y descarga. Las técnicas que existen hoy en día en el mercado son contención, protección y conservación, comunicación, facilidad de fabricación, comodidad y uso y por ultimo almacenamiento y distribución²².

Los Pallets o estibas, los cuales funcionan como plataformas para transporte, en ellas pueden depositarse cantidades limitadas de mercancía ya que es transportada por medios mecánicos como gruis, carretillas o montacargas motorizados. Suelen ser hechas en madera y estructuralmente están conformadas por dos entablados unidos entre sí.

Por otro lado se encuentran unos recipientes de almacenamiento hechos en metal y aluminio denominados contenedores. Sus características varían con el medio de transporte para el que están diseñados, es decir que, su tamaño es diferente si la mercancía es transportada por vía aérea, a que si es por vía terrestre o marítima; los contenedores tienen gran capacidad de carga, con su uso se asegura una entrega rápida y segura, ahorrando tiempo y dinero en la distribución del producto²³.

²⁰ MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO. Empaques y embalajes. Disponible en: <https://docplayer.es/81321707-Empaques-y-embalajes-i-ii-artesantias-de-colombia.html>

²¹ CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Guía práctica: Etiqueta, empaque y embalaje para una exportación. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14382/Giu%C3%ADa%20Pr%C3%A1ctica%20Empaque%20y%20Embalaje.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

²² Ibid., p. 9.

²³ Ibid., p. 11.

1.3 MAÍZ

El maíz, ilustrado en la figura 1, ha sido un alimento muy importante a través de la historia, ya que es el cereal más cultivado en todo el mundo, junto con el trigo y el arroz²⁴; el cual se puede definir como:

*“El maíz (Zea mays L.) Es un cereal perteneciente a la familia de las gramíneas o poáceas cuya descripción taxonómica corresponde a una especie monocotiledónea de crecimiento anual y ciclo vegetativo muy amplio”.*²⁵

Este cereal es originario de México, pero los tipos más desarrollados fueron llevados hacia otros lugares de América, pero después de la conquista, el maíz fue llevado a Europa al ver que era un alimento muy importante en muchas de las preparaciones de los nativos en ese entonces²⁶.

Figura 1. Ejemplar de Maíz Sabanero



Fuente: elaboración propia

En la actualidad, en Colombia y en varias partes del mundo, muchos de los alimentos más consumidos son a base de este cereal, teniendo en cuenta que aporta un gran contenido de nutrientes a quien lo consume, aportando cerca del 12% de la proteína vegetal consumida en Colombia la cual con respecto a la proteína animal contiene una menor cantidad de aminoácidos esenciales y es de menor digestibilidad²⁷.

La importancia no se limita al contenido nutricional para los seres humanos, sino que además, el cultivo del maíz proporciona alimento para los animales y para la

²⁴ IMPORTANCIA. Importancia del maíz. Disponible en: <https://www.importancia.org/maiz.php>

²⁵ GRANDE T., Carlos y OROZCO c., Brigitte. Producción y procesamiento del maíz en Colombia. Revista Científica Guillermo de Ockham. 2013. Vol. 11. No. 1. p. 97-110.

²⁶ ACOSTA, Rosa. El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El maíz en Cuba. Cultivos Tropicales. 2009. Vol. 30. No. 2. p. 113-120.

²⁷ IMBACHÍ N., Paola, *et al.* Evaluación del valor nutricional de recetas típicas elaboradas con maíz común y biofortificado en el Departamento del Cauca, Colombia. Salud pública de México. 2010. Vol. 52. No. 4. p. 305-314.

tierra en forma de forraje. Además tiene una ventaja importante, y es que no es exigente con respecto al lugar donde se cultiva, por lo tanto, puede ser sembrado en diferentes entornos, exceptuando a la Antártida debido a sus condiciones climáticas extremas²⁸. En el caso de Colombia, debido a la variedad de territorios y climas a lo largo y ancho del país, se ha llegado a cultivar maíz en casi todos los ecosistemas, pero más hacia las región Caribe y Andina, por sus climas tropicales y templados respectivamente²⁹.

Para tener un dato más exacto de lo que significa la diversidad del territorio colombiano con respecto a los cultivos de maíz, Roberts et al³⁰. Y Torregosa³¹, realizaron un estudio en el que determinan que en Colombia existen 23 especies de maíz, pero en los bancos de germoplasma hay cerca de unas 5600 que son combinaciones de las mismas especies entre sí, lo que permite que haya tipos de la misma clase, con características diferentes según la zona donde se haya cultivado. Las especies principales que se siembran en Colombia, son el maíz duro, dentado, reventón, dulce, harinoso, ceroso y tunicado, puede ser amarillo que corresponde a un 66,8% o blanco en un 33,2% de la totalidad, siendo para consumo humano y animal respectivamente³².

Para la selección del tipo de maíz, se toma en cuenta la clase que se produce en el municipio de Sibaté, es decir, maíz sabanero; el cual hace parte de los maíces harinosos, tipología más común de consumo humano y de la cual se obtienen diferentes residuos que son susceptibles a su aprovechamiento, a pesar de que parte de ellos están destinados para forraje o para ser utilizados como materia prima para alimentos de ganado³³. A continuación, se identifican los componentes tanto químicos como fisiológicos para de este modo elegir el residuo de la planta que más se ajuste, teniendo en cuenta su contenido de lignina y su facilidad de recolección.

1.3.1 Composición. Inicialmente, se muestra el maíz como producto de un cultivo de alta relevancia a nivel mundial, cuyas características en cuanto a su estructura son fáciles de identificar, ya que proviene de una planta ampliamente reconocida por su altura y cuya apariencia resulta algo singular, llegando a medir entre dos y tres metros de altura o en casos menos comunes llega a medir hasta cinco metros.

²⁸ IMPORTANCIA. Op. cit., disponible en: <https://www.importancia.org/maiz.php>

²⁹ SALGAR, Lina M. El cultivo de maíz en Colombia. 2005. Revista Semilla. Edición 22/23

³⁰ ROBERTS, L., Grant, et al. Razas de maíz en Colombia. Boletín Técnico (2). Ministerio de Agricultura de Colombia. Departamento de Investigación agropecuaria. Bogotá, Colombia. 1957.

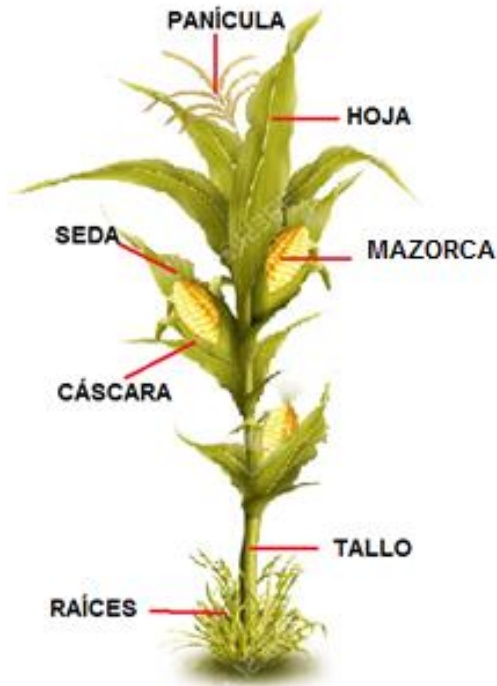
³¹ TORREGROSA, M. Razas de maíz en la Costa Atlántica colombiana. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional. Medellín. 1957.

³² OSPINA R., José. Manual técnico del cultivo de maíz bajo buenas prácticas agrícolas. Medellín. 2015.

³³ Ibid., p. 20.

Esta planta, es monoica, lo que indica que lleva flores tanto masculinas, como femeninas a lo largo de su esqueleto, permitiéndole su auto-reproducción³⁴. En la figura 2, se señalan las partes que se encuentran descritas en la tabla 1, teniendo en cuenta que esta estructura es la misma independiente de la especie³⁵.

Figura 2. Partes de la planta de maíz



Fuente: elaboración propia

³⁴ PASTURAS DE AMÉRICA. Maíz: La planta. 2016. Disponible en: <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/ensilado/maiz-planta/>

³⁵ SACSA. Diferentes partes de una planta de maíz. 2015. Disponible en: <http://www.gruposacsa.com.mx/diferentes-partes-de-una-planta-de-maiz/>

Tabla 1. Descripción de partes de la planta de maíz

No	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	Panícula	Se encuentra en la parte superior de la planta, es la porción masculina de la misma, posee de 20 a 25 millones de granos de polen ³⁶ .
2	Tallo	Es el cuerpo de la planta, es altamente resistente ya que de él se desprenden las hojas y por consiguiente los frutos. Normalmente mide entre dos y tres metros de altura, pero existen especies no tan comunes de maíz en las que el tallo crece por encima de los tres metros.
3	Hojas	Crece a lo largo del tallo de la planta, son largas y por tallo nacen de 16 a 22 hojas ³⁷ .
4	Seda	Es la porción femenina de la planta. Se encuentra en la parte superior de la hoja, varía su color dependiendo de la especie de maíz y produce polen al igual que la flor masculina, pero en menor cantidad (800 a 1000 granos de polen) ³⁸ .
5	Cáscara	Es la hoja que envuelve el fruto, es decir, la mazorca. Son las encargadas de proteger los granos de maíz y también son conocidas como ameros.
6	Mazorca	La conforman la seda, la cáscara, los granos y el olote (también conocido como tusa) de la planta. Es el fruto comestible que da la planta, el cual es recolectado hasta cuando madura y mide entre 15 y 39 cm ³⁹ .
7	Raíces	Es la parte inferior de la planta por donde absorbe los nutrientes del suelo. Las plantas de maíz tienen dos secciones de raíces, aéreas que se encuentran en la parte superior del suelo; y las raíces de la corona que se encuentran bajo la tierra.

Fuente: elaboración propia

Cada una de las partes de su estructura tiene sus propias características, el tallo es la parte que tiene el mayor contenido de lignina pero en cuanto a proteína bruta tiene uno de los porcentajes más bajo; solo contiene 3,1% mientras que las hojas tienen un contenido de entre 4 y 7 %, y las mazorcas contienen 4,7% de proteína bruta. Por su parte, la pared celular de una planta o árbol es rica en celulosa, con

³⁶ INFOAGRO. El cultivo del maíz (1° parte). (s/f) [En línea] Disponible en: <http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm>

³⁷ MAYA. El maíz, origen anatomía y usos. (s/f). [En línea] Disponible en: <https://www.mayasl.com/maiz-origen-anatomia-usos/>

³⁸ INFOAGRO. El cultivo del maíz (1° parte). (s/f) [En línea] Disponible en: <http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm>

³⁹ MAYA. El maíz, origen anatomía y usos. (s/f). [En línea] Disponible en: <https://www.mayasl.com/maiz-origen-anatomia-usos/>

un tanto de hemicelulosa y lignina entre otras cosas al igual que la planta de maíz a pesar de no ser una especie maderable, razón por la cual el contenido de lignina es relativamente bajo con respecto a otras plantas que existen, lo cual se ve evidenciado en la rigidez de su superficie, pero cuando la planta de maíz se convierte en residuo, produce un alto contenido de azúcares solubles lo que le permite tener un alto valor energético⁴⁰.

La determinación de componentes químicos de la planta de maíz es un proceso que se basa en la experimentación, como es el caso de un estudio realizado por Treviño, Hernández y Caballero⁴¹, en el que se analiza el valor nutritivo que tienen las hojas y el tallo de la planta de maíz medido en porcentajes, los resultados encontrados en el estudio mencionado se extrajeron y se registraron en la tabla 2.

Basando la selección en los resultados del estudio, se podría determinar fácilmente que el tallo es la parte de la planta que contiene mayor cantidad de lignina en la etapa de post maduración como se señala en la tabla 2, pero al pensar en la recolección de residuos para realizar el proceso de extracción de lignina resulta ser más dispendiosa para los tallos que para las hojas, ya que estas últimas se consiguen más fácilmente.

Tabla 2. Componentes del tallo y de las hojas de la planta de maíz

		TALLO	HOJAS	TALLO+HOJAS	
PLANTA CON EL GRANO EN ESTADO PASTOSO	Proteína bruta	8,3	10,6	9,6	
	Extracto etéreo	1,1	2,2	1,4	
	Fibra neutro detergente	49,0	62,5	56,8	
	Fibra ácido detergente	30,6	38,1	34,3	
	Celulosa	23,6	24,6	24,2	
	Lignina	5,8	5,6	5,7	
	Azúcares solubles	35,3	7,3	20,2	
	Cenizas	8,9	16,5	11,2	
	PLANTA CON EL GRANO EN ESTADO MADURO	Proteína bruta	7,6	9,3	8,4
		Extracto etéreo	1,0	1,8	1,2
Fibra neutro detergente		51,4	66,8	58,8	
Fibra ácido detergente		32,0	42,2	38,0	
Celulosa		24,8	27,9	26,6	
Lignina		6,3	6,8	6,5	
Azúcares solubles		31,0	7,7	16,4	
Cenizas		8,2	14,7	10,4	

Fuente: estudio del valor nutritivo de las hojas y el tallo del maíz híbrido de tallo azucarado.

⁴⁰ BASAURE, Patricio. Maíz: Composición del rastrojo. 2008. Disponible en: <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/15476.html>

⁴¹ TREVIÑO, J; HERNÁNDEZ, T y CABALLERO, R. Estudio del valor nutritivo de las hojas y el tallo de maíz híbrido de tallo azucarado E-10. En: Pastos. Madrid. 1973.

Apoyándose de la información de la tabla 2, en la cual se evidencia que el contenido de lignina no varía significativamente en la hojas con respecto al tallo, ya que la concentración de lignina en el tallo en estado pastoso es ligeramente mayor con un 2% sobre la concentración obtenida de las hojas; mientras que cuando la planta alcanza su punto de maduración las hojas superar el contenido del biopolímero por un 0,5% sobre el contenido en el tallo; y además teniendo en cuenta la facilidad de recolección, se decide seleccionar a las hojas de mazorca, también conocido en Colombia como ameros para la realización del procedimiento para obtener el agente de polimerización necesario para el aglomerado, como se evidencia en la tabla 1 y 2.

1.3.2 Hoja de Maíz. La biomasa producida, está distribuida como 50% de grano que es cosechado para el consumo y el otro 50% corresponde a residuos, entre los que se encuentran cañas, hojas, mazorcas y ameros, cuya producción se estima entre 20 y 35 toneladas por cada hectárea sembrada, teniendo en cuenta que la composición de estos varía según la especie de maíz y el modo de cultivo⁴².

Amero, es la forma más común en Colombia para llamar a la hoja de la mazorca, pero en algunos países es conocido como “chala”, “chilpe”, “doblador” o “farolla”.⁴³

También éste autor afirma que el aprovechamiento de la biomasa residual producida en este cultivo es limitado, normalmente se usa como alimento para animales, debido a su alto contenido de nutrientes como proteína vegetal, como ya se mencionó anteriormente. La hoja que envuelve la mazorca es el residuo que se produce en mayor cantidad y generalmente se encuentra en los lugares donde se comercializa, lo que permite recolectarlas fácilmente y llevarlas al laboratorio para la obtención de lignina. Las hojas son también usadas para la preparación de alimentos típicos regionales y para la elaboración de artesanías.

Al residuo se le puede proporcionar un valor agregado importante, mediante la utilización de sus componentes en otros procesos. De esta manera, se selecciona la hoja de maíz como materia prima del proceso de extracción de lignina, por tal motivo, a continuación se describe su estructura, composición e importancia.

⁴² BASAURE, Patricio. Op. cit., disponible en: <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/15476.html>

⁴³ MAUREEN'DI. Propiedades de la chala de maíz. 2010. Disponible en: <http://envasescelulosicoschalademaiz.blogspot.com/2010/10/propiedades-de-la-chala-de-maiz.html>

1.3.3 Lignina. La lignina es el biopolímero que abunda en la pared celular de las plantas junto con la celulosa y la hemicelulosa, la cantidad de componentes dentro de la pared varía dependiendo del tipo de planta. Se forma mediante reacciones químicas que suceden en el periodo de fotosíntesis, de modo que se considera como un recurso renovable, de fácil recolección y de potencial uso industrial⁴⁴.

Es el segundo biopolímero más abundante de la tierra después de la celulosa, su significado proviene del latín *lignum* que traduce madera. Es una sustancia hidrofóbica que elimina el agua de las paredes celulares de la planta, facilita las operaciones de transporte de nutrientes de la célula y le proporciona resistencia tanto mecánica como resistencia a ser penetrada por bacterias⁴⁵.

Chávez & Domine⁴⁶ afirman que las clases de lignina difieren en su estructura según su método de extracción: la lignina tipo sulfito, es producida por el proceso sulfito usado para obtener pasta celulósica, es la lignina más abundante en la industria; la tipo kraft, solía ser la más abundante en el mercado, y era obtenida a partir de una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio; y la tipo soda, es obtenida a partir de plantas no maderables.

Para extraerla existen varios métodos, los más conocidos son el ácido, el alcalino y el método por solventes orgánicos. Cada uno da origen a una lignina con una estructura diferente a las demás. Para el caso de la extracción con medio ácido la molécula de lignina es fractura para lograr su separación, mientras que con los otros métodos la lignina es solubilizada y fácilmente extraída.

1.4 AGLOMERADO

El término hace referencia a la lámina formada por partículas muy unidas entre sí mediante una sustancia que funciona como adhesivo para ellas, esta sustancia también es conocida como aglomerante y es la que se encarga de mantener estas partículas juntas en placas uniformes. La forma de lámina se obtiene mediante un proceso de prensado que involucra altas presiones y temperaturas elevadas, el cual se realiza una vez se haya hecho la mezcla y se haya dispuesto en un molde⁴⁷.

⁴⁴ CHÁVEZ S., Marvin y DOMINE, Marcelo. Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. En: Avances en Ciencias e Ingeniería. 2013. Vol. 4. No. 4. p. 15-46.

⁴⁵ ATLAS DE HISTOLOGÍA VEGETAL Y ANIMAL. Tejidos y órganos vegetales: Lignina. Disponible en: <https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-v/ampliaciones/lignina.php>

⁴⁶ CHÁVEZ S., Marvin y DOMINE, Marcelo. Op. cit., p. 17.

⁴⁷ GAITAN, Alexander; FONTHAL, Gerardo Y ARIZA C., Hernando. Fabricación y propiedades físicas de aglomerados de *Pennisetum purpureum* schum, *Philodendron longirrhizum* y *Musa acuminata*. Rev Cie Téc Agr. Vol.25. No.1. San José de las Lajas. 2016.

El tema de aglomerados no es nada nuevo, de hecho existen materiales a base de madera usados en muebles o laminas para construcción, la novedad está en el uso de la lignina como aglomerante, puesto que lo que se usa actualmente para elaborar este material es resina, que al igual que la lignina, se puede obtener de fuentes naturales como las plantas y los árboles, pero las resinas que se usan para los aglomerados son de origen sintético, por consiguiente al ser desechadas no se degradan causando un problema de contaminación al medio ambiente⁴⁸, por tal razón es que el uso de biopolímeros como la lignina es una alternativa que permite reducir el impacto que se genera no solo con el uso de las resinas, sino con la alta producción de retazos y virutas generadas en los procesos del cuero, haciendo uso de residuos como las hojas de mazorca que se obtienen mediante el proceso de recolección en los cultivos de manera totalmente natural.

Un aglomerado se puede realizar con cualquier materia prima que se encuentre en forma de viruta, bien sea con maderas vírgenes o materiales reciclados como residuos de construcción, material de embalajes, muebles viejos u otros similares⁴⁹. El aglomerado se consigue mediante un método de polimerización de la lignina, la cual se incorpora reaccionando en los radicales libres del anillo aromático, aunque también lo puede hacer desde su cadena alifática, pero es menos común; para aumentar los sitios activos de la molécula, se modifica la lignina con procesos de desmetilación o fenolación, para aumentar su reactividad⁵⁰.

⁴⁸ ARIAS F. Alejandro J. Op. cit., p. 5.

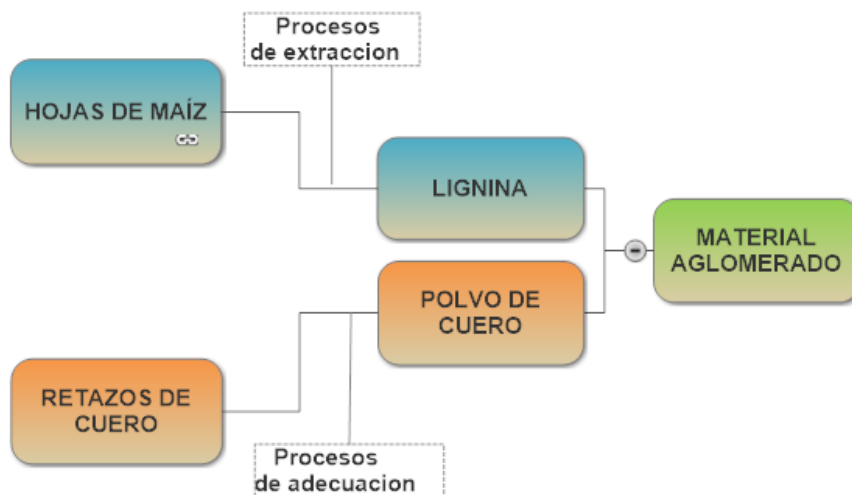
⁴⁹ RIVAROLA, A.; ROJO, L y ARENA, A. Uso de materiales recuperados para la conformación de placas de aglomerado utilizados en la industria del mueble. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9. 2005.

⁵⁰ TURUNEN, Marko, et al. Modification of phenol-formaldehyde resin resins by lignin, starch, and urea. Applied polymer science. Vol. 88. No. 2. 2003. p. 582-588.

2. SELECCIÓN DE PROCESOS UNITARIOS PARA LA ELABORACIÓN DE UN AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA

La búsqueda bibliográfica es la herramienta principal para seleccionar los procesos que deben llevarse a cabo en la obtención del material aglomerado, por lo tanto, en este capítulo se plantea una metodología que se divide en tres núcleos: extracción de lignina, adecuación de cuero y elaboración del aglomerado, como se muestra en la figura 3; los cuales a su vez contienen las especificaciones respectivas que permitirán ajustar el material de acuerdo a las características propias de un empaque para calzado.

Figura 3. Esquema general de proceso



Fuente: elaboración propia

Para el primer bloque del proceso, resulta necesario establecer un método que permita extraer la lignina de los ameros de maíz, el cual puede ser mecánico, químico o biológico; clasificándose a su vez en dos grupos de acuerdo a la forma en que se obtiene la lignina; en el primer grupo se encuentran los que liberan la celulosa y la hemicelulosa dejando la lignina insoluble como residuo, mientras que en el segundo grupo se encuentran los que desarrollan métodos que solubilizan la lignina dejando la celulosa y la hemicelulosa como residuo⁵¹.

Para facilitar los procesos químicos que se llevan a cabo, la materia prima se prepara sometiéndola a un secado por convección y posteriormente a molienda. El proceso de secado evita que en la molienda hayan atascamientos de material por el alto contenido de humedad, mientras que el segundo proceso se realiza debido a que entre menor sea el tamaño de partícula, mayor es su reactividad, lo que

⁵¹ CHÁVEZ S., Marvin y DOMINE, Marcelo. Op. cit., p. 20.

permite un mejor desempeño en la fase de extracción de lignina de la hoja de maíz⁵².

Para la obtención de lignina se establece un pretratamiento químico que consiste en un proceso de pulpeo similar al que se realiza en la fabricación de papel o en la reutilización de la biomasa, el cual tiene como objetivo separar la lignina de los demás componentes de los ameros de maíz, para su posterior extracción⁵³. Dentro de los tratamientos químicos se encuentran la ozonólisis, la hidrólisis ácida o alcalina y el uso de solventes orgánicos; según un estudio realizado en el que se comparan los tres métodos químicos para deslignificar el tallo de yuca se determina que el pretratamiento ácido remueve en promedio el 27.08% de lignina; el alcalino 36.35% y el tratamiento por solventes orgánicos (etanol) remueve el 17.87%⁵⁴.

Tabla 3. Resultados para métodos de pretratamiento para remoción de lignina del tallo de yuca

Pretratamiento	%R.L*	Análisis
Ácido	27.08	El porcentaje de lignina puede verse afectado por el tipo de ácido que se emplee y la concentración del mismo, por lo que en este caso el ácido no es eficiente en la remoción de lignina sino en la fragmentación de la molécula y en la remoción de cerca del 100% de hemicelulosa.
Alcalino	36.35	Gracias al ion Na ⁺ del hidróxido de sodio, el pretratamiento alcalino presentó mayores porcentajes de recuperación de lignina del tallo de yuca, y se propone en el estudio realizar cambios en las concentraciones debido a que puede mejorar los resultados.
Solvente orgánico	17.87	El etanol no tuvo efecto sobre la solubilización de la celulosa y la hemicelulosa, lo que impidió la separación de la lignina, arrojando el porcentaje más bajo en remoción de esta molécula.

* % Recuperación de lignina.

Fuente: Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico sobre la deslignificación de Tallos de Yuca

En la tabla 3, se presenta el análisis entregado por el estudio en el que se determina que el tratamiento alcalino es el más adecuado para extraer lignina del tallo de yuca,

⁵² SALINAS Y., Francisco A. Evaluación operacional de un sistema de molienda molino de bolas hardinge para mantener la eficiencia y la clasificación del mineral en la empresa Minalta s.a. del cantón Zaruma, provincia de el oro en el año 2014. Ingeniero Químico. Ecuador. Universidad técnica de Machala. 2015.

⁵³ GÓMEZ, Elkin; RIOS, Luis y PEÑA, Juan. Efecto del pretratamiento de biomasa maderera en el rendimiento a Etanol. Información tecnológica. Vol 24. No. 5. 2013.

⁵⁴ REALES, Juan; CASTAÑO, Hader y ZAPATA, José. Evaluación de tres métodos de pretratamiento químico sobre la deslignificación de tallos de yuca. Vol. 27. No. 3. 2016. p. 11-22.

el cual solubiliza la lignina y posteriormente precipitada con ácido sulfúrico concentrado, permitiendo que se solidifique para filtrarla y secarla.

Las muestras de lignina que se obtengan de la hidrólisis alcalina, serán analizadas mediante una espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) para verificar que el compuesto obtenido corresponde a esta molécula.

Para el procesamiento de los ameros de maíz, se establecen procesos unitarios de secado, molienda, hidrólisis alcalina y extracción con ácido fuerte para la obtención de lignina; los procesos necesarios para la adecuación del cuero residual comprenden ciclos de limpieza de retazos y molienda de los mismos; finalmente para la elaboración del aglomerado de cuero se propone realizar una polimerización por adición y posteriormente un prensado de la placa, para obtener el material requerido de acuerdo a las condiciones de empaque. Para garantizar el éxito en cada proceso, las condiciones de operación son fijadas mediante el desarrollo de diseños experimentales para secado de hojas de maíz, molienda de las mismas y para la elaboración del material aglomerado.

Una vez finalizada la metodología para crear el material aglomerado, se iniciará un periodo en el que las propiedades de este serán evaluadas mediante una prueba de tensión para determinar la cantidad adecuada de lignina que permita usar el material en elaboración de un empaque de calzado.

Dentro de la metodología establecida, se contempla la elaboración de los balances de materia y energía para cada unidad de proceso seleccionada.

2.1 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE LIGNINA

La obtención de lignina lleva consigo una serie de procesos que comienzan con la recopilación y adecuación de la materia prima y terminan con el tratamiento químico para extraerla. Inicialmente, se deberá recolectar suficiente material lignocelulósico (hojas de mazorca), las cuales deberán ser separadas en varias muestras que permitan un mejor manejo en las operaciones posteriores.

Después de la selección del material lignocelulósico que se usará en la extracción de lignina, se determina que deben seguirse una serie de tratamientos mecánicos que acompañarán la hidrólisis, que aunque pueden no ser necesarios, tienen un efecto significativo en cuanto a la obtención de mejores resultados si se compara con procesos que no los realicen⁵⁵.

Dentro de los pre-tratamientos se incluye una operación de molienda que tiene como fin aumentar el área de superficie de hidrólisis y reducir el grado de

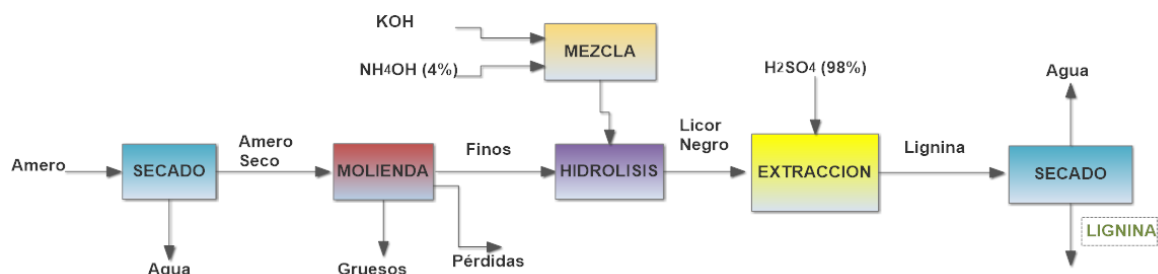
⁵⁵ MORALES DE LA ROSA, Silvia. Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos. Doctor en ciencias químicas. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. 2015. p. 28.

polimerización de los compuestos que allí intervienen, para mejorar rendimientos en el proceso⁵⁶. Para evitar pérdidas de material, o atascamientos en el molino se agrega una operación de secado de material lignocelulósico previo a la molienda.

Posterior a la solubilización de la lignina se establece un proceso que la precipite y permita su extracción final. A este proceso se le suma un secado final que permitirá retirar los restos de líquido de la muestra de lignina obtenida. Es importante aclarar que aunque en la figura 4 no se encuentre ilustrado, se realizaron dos procesos de filtración antes y después de la extracción, para separar en primera instancia el licor negro de la celulosa y la hemicelulosa; y en segunda instancia para obtener la lignina en la torta de filtrado. De esta manera, para los cálculos posteriores se tienen en cuenta estas unidades de separación.

En la figura 4, se encuentra un diagrama general que permite comprender la secuencia establecida para la fase de obtención de lignina.

Figura 4. Diagrama general para obtención de lignina



Fuente: elaboración propia

2.1.1 Procesos para la adecuación del amero. Los tratamientos iniciales que se le realizan a la materia prima son netamente físicos, ya que consisten en eliminar una buena parte del contenido de agua para una posterior reducción del tamaño de partícula. El contenido de agua se reduce para un mejor manejo del material en el proceso de molienda, evitando así atascamientos o pérdida de material dentro del molino⁵⁷.

Se presentan a continuación las metodologías planteadas para los procesos de adecuación de ameros, entre los que se encuentran secado, molienda y tamizado; para los cuales se establecen los diseños de experimentos, los balances de materia y los balances de energía.

⁵⁶ CORTES O., William G. Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos. *En: Revista de Tecnología*. Bogotá D.C. 2014. Vol. 13. No. 1. p. 39-44.

⁵⁷ PERRY, Robert; GREEN, Den y MALONEY, James. Manual del ingeniero químico. Sexta edición. Mc. Graw Hill. USA. 1997.

2.1.1.1 Proceso de secado del amero. El secado se realiza en un horno Mermert UN 240 que se encuentra en la figura 5, en el cual las condiciones deberán estar estables antes de colocar los ameros a secar. La determinación de la temperatura adecuada para el proceso de secado, se basa en el planteamiento de un diseño de experimentos con dos niveles cuyos valores se basan en datos bibliográficos, los cuales destacan que se debe tener especial cuidado en este proceso por la facilidad de degradación que tienen los componentes a las altas temperaturas; para el caso específico del amero de maíz, Betancourt⁵⁸ menciona a los procesos de descomposición térmica de la hemicelulosa y la celulosa cerca de los 180°C y 240°C respectivamente, mientras que para la lignina el punto está cerca de los 280°C.

Figura 5. Horno Mermert UN 240 utilizado para las operaciones de secado



Fuente: elaboración propia

Las altas temperaturas, pueden desencadenar reacciones que llegan a formar otros compuestos en la biomasa, afectando la composición y la estabilidad de los elementos. Para evitarlos, la temperatura no debe exceder los 100°C ni tampoco estar expuesta en el horno por tiempos prolongados⁵⁹.

⁵⁸ BETANCOURT, S, *et al.* Degradación térmica de fibras naturales procedentes de la calceta de plátano (estudio cinético). Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. p. 215-219.

⁵⁹ VILLALBA, Jorge y ARZOLA, Nelson. Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa. *En:* Ingeniería y desarrollo. Vol. 33. No. 2. Bogotá. 2015.

Adicionalmente, la temperatura de secado para el maíz debe estar cerca de los 60°C, según un estudio que se realizó para la desecación de hojas de maíz para infusión, dicha temperatura se maneja para secado de biomasa y otro tipo de hojas que se asemejan a la hoja de maíz⁶⁰.

Se propone realizar un secado para dos muestras diferentes que estén por encima de 60°C y por debajo de los 100°C para cada una por un periodo de tiempo. Se realizará un registro del peso antes y después de entrar al horno, para posteriormente calcular la pérdida de peso en cada una de las muestras con la siguiente expresión:

$$X = \frac{X_i - X_m}{X_i} \quad (1)$$

Dónde:

X_i = *Peso inicial de la muestra*

X_m = *Peso final*

La existencia de teoría acerca de tiempos de secado de hojas de maíz es muy baja, por lo cual se procede a determinar la que mejor resultados arroje, teniendo en cuenta que entre más alta sea la temperatura, menor deberá ser el tiempo de secado⁶¹. Para el secado que se llevará a cabo, se propone pesar las muestras antes y después de la operación para el cálculo de las pérdidas del material.

El objetivo del secado es lograr una reducción en el contenido de humedad, por esta razón se plantea un diseño de experimentos que arroje como resultado el tiempo y la temperatura de secado que garantizan una reducción aceptable de humedad, sin incurrir en altos costos energéticos.

2.1.1.2 Planteamiento del diseño experimental para secado de hojas de maíz. El secado requiere del planteamiento de un diseño de experimentos que permita evaluar la pérdida de peso en las hojas mediante la modificación de variables como el tiempo y la temperatura de secado, para verificar si están directamente relacionadas con la pérdida de agua del material reflejada en la disminución de su peso.

De esta manera se propone un diseño superficie respuesta de tipo central compuesto con puntos estrella, seleccionado porque evalúa no solo las interacciones entre las variables sino también su comportamiento sobre el experimento; además es un tipo de diseño que permite optimizar la variable de respuesta (pérdida de peso), es decir, minimizarla o como en este caso maximizarla

⁶⁰ CASAÑAS, Jorge. Elaboración de una infusión a base de hojas de mazorca (*Zea Mays*). Ingeniero Químico. Valencia. Universidad de Carabobo. 2012.

⁶¹ Ibid., p. 21.

mediante la modificación de las variables independientes (temperatura y tiempo). El diseño se realiza por triplicado, considerando que solo dos puntos no permiten sesgar la respuesta a una de las dos variables, por lo tanto, la tercera replica muchas veces sirve para confirmar si los dos puntos anteriores están muy distantes⁶².

Para cada una de las variables se seleccionaron dos niveles, uno alto y uno bajo, para evaluar el comportamiento de la hoja de maíz en todo el intervalo. Los valores para los niveles del tiempo, son 2 y 4 horas (120 y 240 minutos), teniendo en cuenta que si la biomasa está a temperaturas altas, el tiempo debe ser corto para evitar desnaturalización de sus componentes; y para la temperatura se establecieron los valores de 60 y 80°C de acuerdo a lo descrito en la sección 2.1.1.1. Para el planteamiento y desarrollo del diseño experimental se emplea Statgraphics XVII-X64, el cual evalúa la variable de respuesta, que en este caso corresponde a los datos de pérdida de peso.

La pérdida de peso se calcula mediante la ecuación 1 y se registra en la tabla 4 generada por el software mencionado para realizar el respectivo análisis del experimento, y de esta manera obtener las condiciones más adecuadas para llevar a cabo el secado.

Tabla 4. Tabla para toma de datos de secado para el diseño de experimentos

<i>BLOQUE</i>	<i>TEMPERATURA (°C)</i>	<i>TIEMPO (MIN)</i>	<i>PÉRDIDA DE PESO (g)</i>
1	55,8579	180	
1	70	264,853	
1	60	120	
1	80	240	
1	70	95,1472	
1	80	120	
1	84,1421	180	
1	60	240	
1	70	180	
1	70	180	

⁶² MONGOMERY, D. Diseño y análisis de experimentos. Vol. 2. 2004. Arizona. p. 427-430.

Tabla 4. (Continuación)

<i>BLOQUE</i>	<i>TEMPERATURA (°C)</i>	<i>TIEMPO (MIN)</i>	<i>PÉRDIDA DE PESO (g)</i>
2	55,8579	180	
2	70	264,853	
2	60	120	
2	80	240	
2	70	95,1472	
2	80	120	
2	84,1421	180	
2	60	240	
2	70	180	
2	70	180	
3	55,8579	180	
3	70	264,853	
3	60	120	
3	80	240	
3	70	95,1472	
3	80	120	
3	84,1421	180	
3	60	240	
3	70	180	
3	70	180	

Fuente: software Statgraphics Centurion XVII-X64

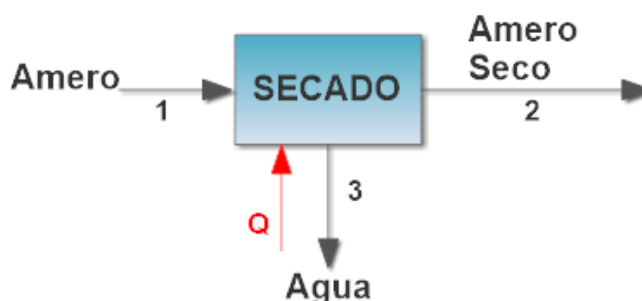
Una vez realizado el secado como lo indica la tabla 4, se deberán registrar los datos de los pesos antes y después de la operación para realizar el cálculo de la pérdida de peso en cada muestra haciendo uso de la ecuación 1.

Cuando se tenga el resultado de la temperatura y el tiempo más adecuados para la reducción del peso en las hojas de mazorca, se procede a realizar el secado con el resto de material, para posteriormente llevarlo al proceso de molienda.

2.1.1.3 Planteamiento de balances de materia y energía para el proceso de secado de ameros. Al terminar el secado, se realiza el estudio del proceso mediante balances de materia y energía teniendo en cuenta que el sistema se encuentra en estado estable y que no hay reacción química.

En este proceso intervienen variables de tiempo y temperatura para reducir o retirar el agua no ligada de los ameros. Por lo tanto, se plantea un balance con entradas de hojas de mazorca y salidas de agua y material seco, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Unidad de Secado para balance masa y energía



Fuente: elaboración propia

El balance de masa se realiza a partir del balance global y de los balances de cada componente dentro del sistema, para determinar todos los flujos y las composiciones de cada corriente. Mientras que para realizar el balance de energía, se hace uso de la siguiente ecuación.⁶³

$$Q = \Delta H = m * Cp * (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Para el balance de energía, se debe tener en cuenta que el sistema se encuentra en estado estacionario y que no hay reacción química.

2.1.1.4 Proceso de molienda de ameros. La operación se llevará a cabo en un molino de cuchillas marca Universal L60013, como se muestra en la figura 7. Este proceso depende del tamaño inicial del material que se quiere moler, por lo tanto, se realizará una molienda que permita reducir el tamaño de partícula de los ameros hasta un diámetro menor, previo al proceso de hidrólisis.

El material proveniente del proceso de secado, deberá pesarse y luego someterse a una reducción del tamaño de partícula en un molino de cuchillas, siendo el más adecuado para materiales secos, ya que de esta manera se pueden evitar atascamientos y por ende pérdidas significativas en la muestra.⁶⁴

⁶³ CASTELLANOS, Jesús; ESPINOSA, Rubén y ZAMORA, Alexis. Estimación de las propiedades relacionadas con el comportamiento energético de la biomasa. En: EcoSolar. Santa Clara, Cuba. 2004.

⁶⁴ PERRY, Robert; GREEN, Den y MALONEY, James. Op. cit., p. 902.

Figura 7. Molino Universal L60013



Fuente: elaboración propia

El tamaño de partícula afecta la eficiencia del proceso y mejora las características de la transferencia de masa más no influye en la concentración de lignina que se obtiene al final de la extracción⁶⁵. Se determina que la partícula deberá tener un tamaño máximo de 1mm, los valores superiores no tendrán un efecto significativo en el proceso⁶⁶. Una vez terminada la molienda, la muestra deberá pesarse para comparar con el peso inicial y así calcular las pérdidas de material que se puedan originar durante la operación.

Las partículas obtenidas serán utilizadas en los siguientes procesos, para esto se deben separar según el tamaño obtenido después de la molienda, este proceso se realiza mediante tamizado, el cual comienza ajustando un complejo de tamices con las mallas correspondientes a 10 y 80, como se muestra en la figura 8; esta operación se realiza con el fin de obtener el producto de interés, el cual se encuentra en la malla 80.

⁶⁵ MORALES DE LA ROSA, Silvia. Op. cit., p. 37.

⁶⁶ CUASPUD, Olmedo J. Obtención de bioetanol a partir de tallos de maíz. Magister en ciencias-biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. 2017. p. 35.

Figura 8. Complejo de mallas para tamizado de ameros



Fuente: elaboración propia

Una vez terminado el tamizado, se toman las muestras obtenidas en cada malla y se pesan; los gruesos (malla 10) se deberán reprocesar para obtener el tamaño de partícula deseado para el proceso de hidrólisis que viene después; la muestra deberá pesarse antes y después del tamizado para poder calcular el porcentaje de pérdida de material en dicha operación, haciendo uso de la ecuación 1.

Para llegar al tamaño de partícula deseado se deben tener en cuenta variables como tiempo, tipo de molino y velocidad de molienda. Para este caso, se seleccionó tiempo y velocidad de molino para evaluar la incidencia que puedan tener sobre el proceso, para esto, se plantea el siguiente diseño de experimentos, que permitirá establecer las condiciones idóneas de molienda para lograr el tamaño de partícula deseado.

2.1.1.5 Planteamiento del diseño experimental para la molienda de amero. Para el desarrollo adecuado del proceso de molienda de las hojas de maíz, se plantea un diseño de experimentos de tipo central compuesto con puntos estrella, por las razones especificadas en la sección 2.1.1.2. Este diseño también se realiza por triplicado para evaluar si en más de dos ocasiones la variable de respuesta se sesga a una condición en particular.

Para evaluar el arreglo que maximiza la cantidad de material lignocelulósico en el tamiz 80, se fijaron dos niveles bajos y dos altos tanto para tiempo como para velocidad del molino. Los valores de velocidad corresponden a 900 y 2700 rpm (velocidad 2 y 3 del molino) seleccionados por ser valores medios del equipo y porque el material a moler no requiere velocidades más altas; para el tiempo, los valores seleccionados 10 y 30 segundos, debido a que al tener velocidades medias y material seco, los resultados de reducción de tamaño pueden verse en un tiempo

corto. En la tabla 5, se deberán registrar los datos correspondientes al peso de cada muestra en el tamiz 80, para evaluar las condiciones que maximizan la producción de material fino.

La molienda deberá realizarse de acuerdo a lo planteado en el diseño, por lo tanto, se seleccionarán 30 muestras de ameros previamente secos, se molerán y se tamizarán. Para este proceso de molienda, se plantea un análisis de tamaño de partícula de acuerdo a lo descrito en numeral 2.1.1.4., el cual consiste en determinar la cantidad de sólidos gruesos que quedaron con relación a los más finos.

Al final de la operación, se realiza el pesado del material retenido en cada tamiz, para determinar el porcentaje de retención tanto de finos como de gruesos, mediante la siguiente expresión⁶⁷:

$$\%R = \frac{PR}{M_t} * 100 \quad (3)$$

Donde $\%R$ es el porcentaje de retención de cada malla; PR es el peso de la muestra retenido en la malla y M_t es el peso total de la muestra seca.

Tabla 5. Tabla para toma de datos de molienda para el diseño de experimentos

BLOQUE	VELOCIDAD DEL MOLINO (rpm)	TIEMPO (s)	CANTIDAD EN EL TAMIZ 80 (g)
1	500	20	
1	500	20	
1	358,579	20	
1	400	10	
1	400	30	
1	500	34,1421	
1	600	30	
1	500	5,85786	
1	641,421	20	
1	600	10	
2	500	20	
2	500	20	
2	358,579	20	
2	400	10	
2	400	30	

⁶⁷ ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO. [Anónimo]

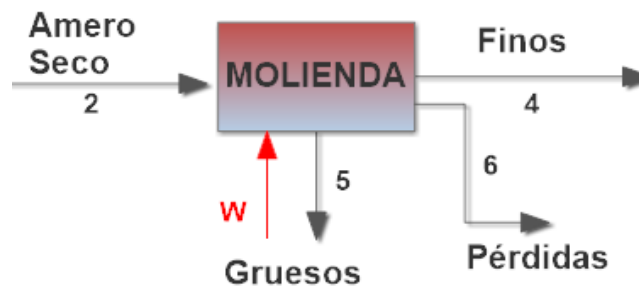
Tabla 5. (Continuación)

BLOQUE	VELOCIDAD DEL MOLINO (rpm)	TIEMPO (s)	CANTIDAD EN EL TAMIZ 80 (g)
2	500	34,1421	
2	600	30	
2	500	5,85786	
2	641,421	20	
2	600	10	
3	500	20	
3	500	20	
3	358,579	20	
3	400	10	
3	400	30	
3	500	34,1421	
3	600	30	
3	500	5,85786	
3	641,421	20	
3	600	10	

Fuente: software Statgraphics Centurion XVII-X64

2.1.1.6 Planteamiento de balances de materia y energía para la molienda de ameros. Se plantean dos balances de materia y energía que permitan evaluar el proceso, asumiendo que el sistema se encuentra en estado estable y que no hay reacción química. Por lo tanto, se plantea un balance con entradas de hojas de maíz secas y salidas de material grueso y fino, además de las pérdidas que se dan a lugar durante la operación, en la figura 9 se puede ver mejor el diagrama de esta fase de molienda de ameros.

Figura 9. Tabla para toma de datos de molienda para el diseño de experimentos



Fuente: elaboración propia

Para el balance de energía se tienen en cuenta las mismas apreciaciones que para el balance de masa, siguiendo la siguiente ecuación:

$$w = W_{Equipo} \quad (4)$$

2.1.2 Procesos de hidrólisis y extracción para la obtención de lignina.

Después del conjunto de procesos de adecuación de los ameros, se procede a realizar el pulpeo por hidrólisis alcalina con KOH y amoniaco, que tiene como objetivo recuperar el licor negro en el que se encuentra disuelta la lignina⁶⁸. La lignina es disuelta y posteriormente precipitada por la acción de un ácido fuerte; mientras que es separa por filtración⁶⁹. La metodología que se establece para este procedimiento se divide en las siguientes etapas:

2.1.2.1 Proceso de pulpeo por hidrólisis alcalina para la obtención del licor negro. Este proceso se realiza siguiendo el protocolo establecido por Huang Shi y Langrish, se debe tomar una muestra inicial de 25g de material lignocelulósico, a la cual se le adicionan 1,25g de KOH, mientras que en otro recipiente se realiza una disolución de 6,25g de amoniaco en 160ml de agua desionizada, para posteriormente adicionarla al primer recipiente. La mezcla deberá ser colocada en una plancha de calentamiento con agitador magnético a una temperatura de 155°C y una velocidad de agitación de 2,5 rpm durante un primer periodo de 60 minutos; una vez terminado el tiempo de cocción, dejar que la mezcla se mantenga en temperatura constante durante 45 minutos.

Pasados los 45 minutos de reposo, la muestra se divide en dos fases, líquido (licor negro) y sólido (celulosa, hemicelulosa y extraíbles), por lo tanto, se procede a realizar una filtración haciendo uso de un filtro de matraz de kitasato. Finalmente, se toma la pulpa obtenida y se lava con abundante agua destilada para posterior uso en otros procesos; mientras que el licor negro obtenido es almacenado en un recipiente para la extracción de lignina.

2.1.2.2 Planteamiento de balance de masa y energía para hidrólisis.

Como se muestra en el diagrama de proceso de la figura 10; este proceso se desarrolla a partir de la protonación de radicales asociados a las moléculas de interés, los cuales facilitarán la solubilidad de la lignina mejorando los procesos de extracción y purificación de acuerdo a lo descrito por Faravelli, et al⁷⁰. Por lo cual no se tiene en cuenta la reacción dentro de los balances, sino que se considera una separación de componentes, donde se desliga la lignina de la celulosa y la hemicelulosa.

Para realizar este balance, es necesario conocer la composición inicial de las hojas de maíz, las cuales según un estudio de caracterización corresponden a:

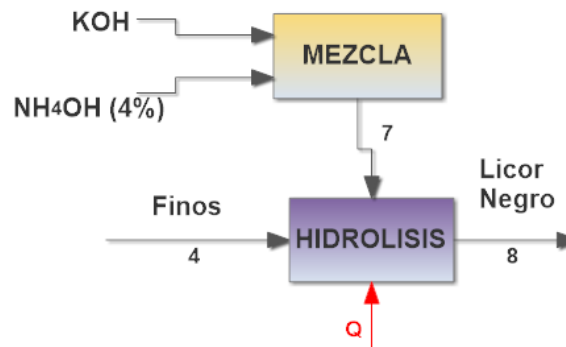
⁶⁸ HUANG, Guolin; SHI, Jeffrey X. y LANGRISH, Tim A. Op. cit., p. 2830.

⁶⁹ RAMÍREZ, José H. y ENRÍQUEZ, Mayerni K. Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del seudotallo de plátano. En: Acta Agron. Vol. 64. No. 3. 2015. p. 211.

⁷⁰ FARVELLI, T., *et al.* Detailed kinetic modeling of the thermal degradation of lignins. En: Biomass and bioenergy. Italia. 2010. Vol. 34. p. 290.

hemicelulosa con 7%, celulosa con 30%, lignina con 23% y 40% que corresponde al agua retirada⁷¹. Para resolver el balance de energía se tiene en cuenta la ecuación 2.

Figura 10. Unidad de hidrólisis para balance de masa y energía



Fuente: elaboración propia

2.1.2.3 Proceso de extracción de lignina del licor negro. Para realizar este procedimiento, se siguió el protocolo de Ramírez y Enríquez, referenciado en la sección 2.1.2, en la que inicialmente se toma el licor negro obtenido del proceso de hidrólisis realizado con los ameros de maíz mediante una hidrólisis con NaOH al 30% p/v para solubilizar la lignina y posteriormente precipitarla con H₂SO₄⁷². Se realiza una medición de pH inicial. Para la recuperación de la lignina disuelta en el licor, serán necesarios 3ml de H₂SO₄ por cada 70ml de licor, por lo tanto, se deberá tomar una bureta y se verterá una cantidad considerable de ácido sulfúrico concentrado teniendo en cuenta la cantidad de muestra de licor que se tenga, para que luego por goteo de los 3ml de H₂SO₄, se precipite la lignina.

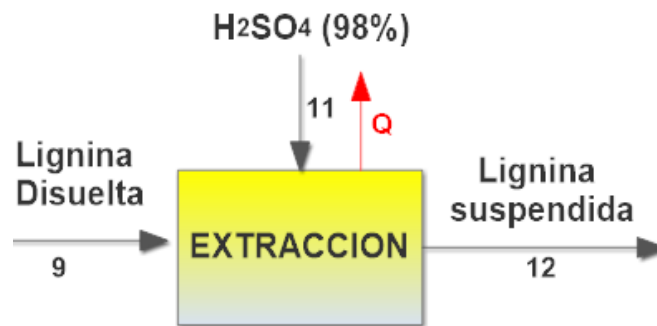
El pH al que la lignina se vuelve insoluble es igual a 2, por lo tanto, después de adicionar el ácido por goteo, se deberá realizar una medición del pH hasta obtener el valor deseado, observando los cambios físicos que se darán a lugar en la muestra. Se observará un sólido en el fondo del recipiente, lo cual indica que la lignina ha precipitado; se debe dejar en reposo por lo menos una hora para realizar la posterior separación por filtrado con matraz de kitasato. Finalmente, la torta de filtrado obtenida, se lava con abundante agua destilada aproximadamente 3 veces para limpiar las posibles impurezas.

⁷¹ GONZÁLEZ, Krystle D. *et al.* Evaluación de las propiedades físicas y químicas de residuos sólidos orgánicos a emplearse en la elaboración de papel. *En:* Luna Azul. 2016. No. 43.

⁷² RAMÍREZ, José H. y ENRÍQUEZ, Mayerni K. *Op. cit.*, p. 211.

2.1.2.4 Planteamiento de balances de masa y energía para extracción de lignina. La extracción de lignina es el proceso en el que un ácido fuerte, en este caso ácido sulfúrico, precipita la lignina inicialmente solubilizada en el licor. De igual forma que en la hidrólisis, se plantea un balance de masa por componente en el cual entra el ácido y la lignina solubilizada para obtener un licor de desecho y la lignina en estado sólido, como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de proceso para operación de extracción de lignina



Fuente: elaboración propia

Los balances de masa pudieron realizarse a partir del balance de masa global, para determinar los flujos y las composiciones de cada corriente, mientras que para el balance de energía se hizo uso de la ecuación 2.

2.1.2.5 Proceso de secado de lignina. Esta fase de secado se realiza en un horno SDL ATLAS 110V, el cual se encuentra en la figura 12. Introducir la muestra al horno manteniendo una temperatura de secado de 50°C por un periodo de tiempo de 24 horas⁷³. El horno deberá precalentarse, mientras se pasa la lignina del papel filtro a un vidrio reloj; es necesario registrar los pesos para determinar la cantidad de lignina obtenida.

⁷³ GONZÁLEZ, Aura M.; HERRERA, Juan P. y RODRÍGUEZ, Antonio. Caracterización de Fracciones de Lignina Extraídas del Licor Negro con Solventes Orgánicos. En: Rev. For. Lat. N° 42. 2007 p. 55.

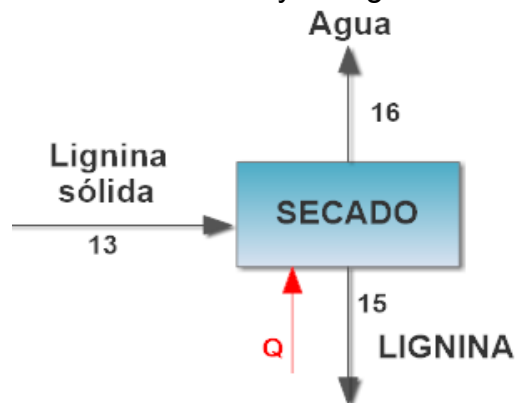
Figura 12. Horno SDL ATLAS 110V para de secado de lignina



Fuente: elaboración propia

2.1.2.6 Planteamiento de balances de masa y energía para secado de lignina. En este proceso intervienen variables de tiempo y temperatura para retirar el agua que se encuentra en las muestras de lignina. Por lo tanto, se plantea un balance con entradas de lignina húmeda y salidas de agua y material seco, como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Unidad de secado para balances de masa y energía



Fuente: elaboración propia

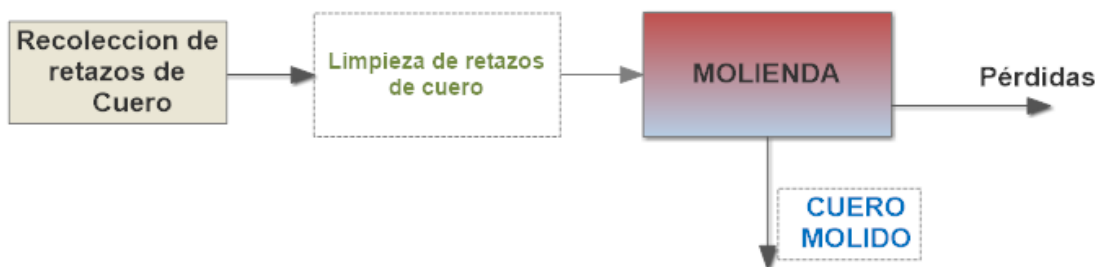
A partir del balance de masa global y del balance por cada especie del proceso se obtienen los valores de los flujos y las composiciones de las corrientes del sistema. Para el caso de los balances de energía se sigue el procedimiento con la ecuación 2, de la misma manera que los procesos anteriores.

2.2 PROCESOS PARA LA ADECUACIÓN DE LOS RETAZOS DE CUERO

La segunda parte del proceso experimental, se centrará en especificar las metodologías que deben llevarse a cabo para la preparación de los residuos de cuero obtenidos de los procesos de elaboración de artículos de calzado y marroquinería del Centro de Manufactura Textil y Cuero del SENA.

Los procesos para la adecuación del material, tienen una cierta similitud con los que se llevaron a cabo en la primera fase con los ameros. A continuación se describen los procedimientos para adaptar los retazos de cuero para el desarrollo del aglomerado, los cuales pueden verse en la figura 14.

Figura 14. Diagrama general para adecuación de cuero



Fuente: elaboración propia

El proceso cuenta con dos unidades después de la recolección en las cuales se realiza una remoción de residuos que se encuentren dentro de los retazos y finalmente una operación de reducción de tamaño que permitirá un mejor manejo del material a la hora de realizar el aglomerado.

2.1.3 Selección de los retazos de cuero. Para la elaboración del material aglomerado se tienen en cuenta todos los retazos que se puedan recolectar sin importar su origen o clase. Dentro de las clases de cuero que se encuentran en el centro de manufactura textil y cuero se destacan los cueros pigmentados, tipo anilinas, naturales y aquellos con acabado especiales; los cuales serán empleados en su totalidad para el experimento, teniendo en cuenta que según su procedencia deberán someterse a un tratamiento de limpieza diferente antes de la molienda.

2.1.4 Caracterización del material. En esta fase se clasifican los retazos seleccionados, dependiendo del tipo de cuero que se haya encontrado, para definir el procedimiento de limpieza que se debe hacer. También es importante identificar las características físicas, es decir, color, textura, apariencia en general, para posteriormente proceder con el proceso de molienda.

2.1.5 Limpieza de los retazos de cuero seleccionados. Los retazos anteriormente seleccionados, traen consigo una serie de impurezas, debido a que durante el proceso de fabricación de los artículos se hizo uso de pegamento, tintas, polvo, entre otras cosas que quedan impregnadas en el material.

Para el caso de residuos sencillos como el polvo, basta con realizar una limpieza con un trapo húmedo; si hay presencia de manchas de algún tipo, se debe hacer uso de una mezcla de agua y detergente neutro para limpiar hasta remover dichas impurezas. Los que tienen algún tipo de pegamento fuerte adherido, se deben sumergir en un solvente que puede ser acetona, hasta remover estos residuos; si este pegamento no logra ser removido con este método, se procede a realizar un raspado al material hasta quitarlo completamente⁷⁴.

2.1.6 Proceso de molienda de cuero. El cuero recolectado del proceso de rebajado, deberá someterse a una reducción de tamaño que le permita convertirse en polvo para realizar el aglomerado. Inicialmente se separa en muestras de 20g y se procede a realizar la molienda a una velocidad constante de 2700rpm durante un tiempo de 20 segundos.

El tamaño de partícula que deberá tener el cuero debe ser inferior a 3.33mm⁷⁵, la reducción de tamaño de partícula permite un mejor manejo de este al momento de realizar el aglomerado. Una vez terminado el procedimiento, la muestra deberá pesarse y almacenarse hasta lograr una cantidad de 1Kg.

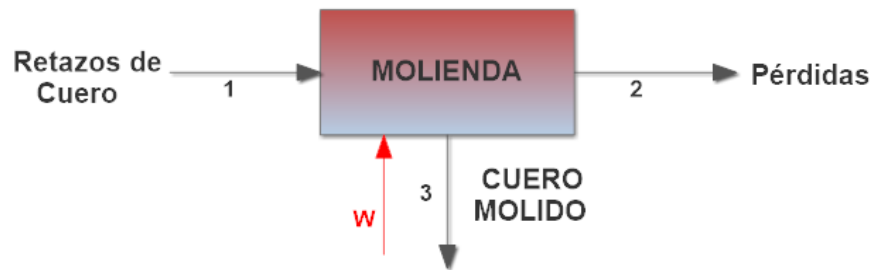
2.1.7 Planteamiento de balances de masa y energía para molienda de retazos de cuero. Se plantean los balances de materia y energía que permitan evaluar el proceso, teniendo en cuenta que el sistema se encuentra en estado estable y que no hay reacción química.

Similar al proceso de molienda de ameros, se calculan los flujos de entradas y salidas de la molienda de cuero de una forma sencilla, ya que al ser procesos de transformación física no requieren de tanta complejidad. A diferencia de la molienda de ameros, para el balance de la unidad referenciada en la figura 15 no se tienen en cuenta los finos y gruesos por separado.

⁷⁴ JARAMILLO O., Alexandra. Referencial nacional de oficios en cuero. En: Ministerio de comercio, industria y turismo. 2006. p. 11.

⁷⁵ ARIAS F. Alejandro J. Op. cit., p. 20.

Figura 15. Diagrama de proceso para operación de molienda de cuero



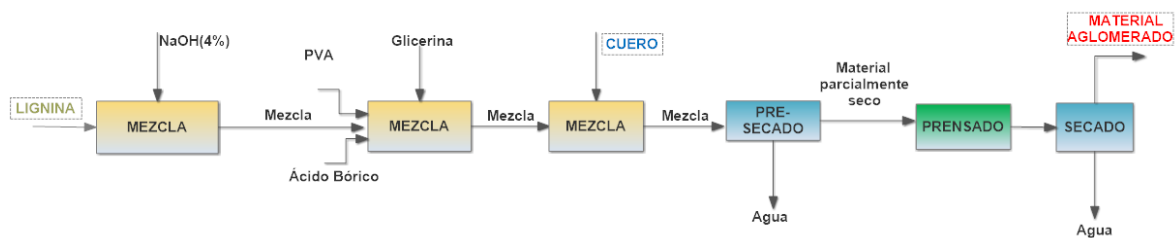
Fuente: elaboración propia

A partir del balance de masa global se lograron obtener los resultados de flujos para cada corriente, mientras que para el balance de energía se usó la ecuación 3 de igual manera que para molienda de las hojas de maíz.

2.3 PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DEL AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA

El objetivo principal de este proyecto se resume en esta fase, por tal motivo, a continuación se describe la metodología experimental para el desarrollo del material aglomerado compuesto por retazos de cuero y lignina, la cual se encuentra más clara en la figura 16.

Figura 16. Diagrama general del proceso de aglomerado



Fuente: elaboración propia

En la figura 16, se ilustra el proceso de mezclado en tres fases diferentes debido a que se realiza en distintos momentos, pero en un mismo recipiente con las mismas condiciones. Por lo tanto, en esta primera figura se mantiene la fase de mezcla en tres momentos para demostrar el proceso de manera más explícita, pero para los cálculos posteriores se maneja la fase de mezclado como una sola unidad.

Después de obtener la mezcla, es necesario someter al material a una operación de prensado y secado para que la placa obtenga mejores características⁷⁶. Antes

⁷⁶ ARIAS. Op. cit., p. 42.

de prensar, se adiciona una fase de pre-secado para que al someter a presión, la placa aún tenga oportunidad de acomodar su estructura.

2.3.1 Polimerización lignina y cuero para la formación del aglomerado. La reacción de polimerización por adición que se desarrollará en la elaboración del material aglomerado, se dará por acción de la lignina en compañía de tres sustancias que actúan como ayudantes del proceso, las cuales son PVA, ácido bórico y glicerina. El procedimiento para realizar el material, se basó en un estudio de la capacidad higroscópica de un material compuesto por polvo de cuero y los componentes ya mencionados.⁷⁷

2.3.1.1 Materiales. A continuación se describen las materias primas necesarias para la construcción del aglomerado, incluyendo los aditivos que ayudarán a mejorar no solo las propiedades del material sino el proceso en sí.

- **Lignina.** La lignina es uno de los polímeros naturales más abundantes en la naturaleza, se emplea para compactar el cuero previamente molido para darle forma al nuevo material compuesto, proporcionándole características de resistencia y dureza.
- **Cuero.** Los retazos de cuero son el componente principal del material aglomerado, los cuales son recolectados en el centro de manufactura textil y cuero del SENA, para ser convertidos en polvo.
- **Aditivos.** Además del cuero y la lignina, las sustancias que se van a usar como aditivos en este proceso son: Glicerina, PVA y ácido bórico. Como la lignina se encuentra en estado sólido, es necesario realizar una disolución con NaOH (4%) con el fin de que se pueda mezclar con el cuero y los demás componentes para formar la pasta del material⁷⁸.

⁷⁷ REYES P., Anderson y VEGA E., Magali. Influencia del polvo esmerilado de cuero, alcohol polivinílico y ácido bórico en la fabricación de un material compuesto con capacidad higroscópica. Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo. 2016.

⁷⁸ CHÁVEZ S., Marvin y DOMINE, Marcelo. Op. cit., p. 29.

2.3.2 Procesos para la elaboración del aglomerado. Después de los procesos para la obtención de lignina y cuero, se procede a realizar la mezcla. Para ello se debe disolver la lignina en 20ml de NaOH (4%), para luego adicionar 1g de ácido bórico y el PVA y posteriormente calentar a 60°C durante 5 minutos. Pasado ese tiempo, se adicionaron 2ml de glicerina pura y se colocó a 70°C por 4 minutos más. Una vez lista la mezcla, se deja enfriar y se mezcla con 5g de polvo de cuero agitando manualmente hasta homogenizar la mezcla. Cuando la masa formada no se pegue en las paredes del recipiente, indicará que ya está lista para vaciar en el molde.

En el proceso no están definidas las cantidades de lignina y PVA que deberán adicionarse a la mezcla, puesto que serán los valores que variarán en el diseño de experimentos que se plantea a continuación.

2.3.3 Planteamiento del diseño experimental para los procesos de aglomerado. Este diseño se realiza con el fin de evaluar las cantidades de lignina y PVA que le proporcionan características de resistencia y a la misma vez plasticidad al nuevo material, las cuales serán determinadas por una prueba de tensión.

Se plantea un diseño de experimentos de tipo central compuesto con puntos estrella, seleccionado para maximizar la variable de respuesta que para este caso es la resistencia del material, reflejada en el módulo de Young.

Para cada una de las variables se seleccionaron dos niveles, uno alto y uno bajo, para evaluar el comportamiento del material a las distintas composiciones. Los valores para lignina, se encuentran entre 1 y 2g, seleccionados de acuerdo a lo descrito en el artículo sobre modificación estructural de lignina, en donde se establecieron bajos niveles del polímero (0.1g de lignina en 1ml de NaOH) y se realizó un escalado para la placa de material, obteniendo dichos valores⁷⁹; y para PVA se establecieron valores entre 2 y 5g de acuerdo al análisis elaborado en la tesis, en el que a mayor cantidad de PVA, el material toma características de resistencia al agua y le da propiedades plásticas al material, tal como se espera para el empaque.

Para el planteamiento y desarrollo del diseño experimental se emplea Statgraphics XVII-X64, el cual evalúa el módulo de elasticidad calculado por un equipo de tensión. El ensayo se hace esta vez por duplicado, teniendo en cuenta que la norma ASTM D882 correspondiente a películas delgadas, permite realizar diseños simplificados. Al plantear el diseño en el programa teniendo en cuenta los niveles y variables anteriormente especificadas se obtiene la tabla 6.

⁷⁹ JIMÉNEZ, Jesús A; GORDILLO D., Bibiana y VEGA, Marco A. Modificación estructural de la lignina extraída a partir de carbones de bajo rango para la obtención de madera sintética. En: Revista Tecnura. Vol. 15. No. 28. 2011. p. 72.

Tabla 6. Tabla para toma de datos de las pruebas del material aglomerado para el diseño de experimentos

BLOQUE	Lignina (g)	PVA (g)	Módulo de Young (MPa)
1	1,5	5,11713	
1	1,5	1,88287	
1	1,5	3,5	
1	2	5	
1	1	5	
1	2	2	
1	1	2	
1	2,03904	3,5	
1	1,5	3,5	
1	0,960955	3,5	
2	1,5	5,11713	
2	1,5	1,88287	
2	1,5	3,5	
2	2	5	
2	1	5	
2	2	2	
2	1	2	
2	2,03904	3,5	
2	1,5	3,5	
2	0,960955	3,5	

Fuente: software Statgraphics Centurion XVII-X64

2.3.4 Proceso de prensado del material aglomerado obtenido. Después de realizar el aglomerado y haber dispuesto la mezcla en moldes metálicos, se procede a colocar cada uno de los recipientes bajo una prensa para obtener láminas del material a presión.

Continuando con el proceso planteado para resinas fenólicas de lignina propuesto por León y Sanabria⁸⁰, se determina que la mezcla debe someterse a una presión de $4,45 \times 10^7 \text{N/m}^2$ durante 5min a una temperatura de 160°C; teniendo en cuenta que este proceso se realiza con el fin de obtener un material uniforme y con mejores propiedades.

Cuando el curado del material haya terminado, se procede a realizar las pruebas físico-mecánicas que permitirán evaluar el comportamiento del material a distintas

⁸⁰ LEÓN, Sandra y SANABRIA, Franklin. Obtención de resinas fenólicas termoestables de lignina extraída del bagazo de la caña de azúcar. *En: Uniciencia*. Vol. 5. No. 1-2. 1988. p. 48.

composiciones, con el fin de determinar en qué porcentaje de lignina, el material cumple con los requerimientos para un empaque.

2.3.5 Aplicación de pruebas físico-mecánicas al nuevo material obtenido.

Para dar respuesta al diseño de experimentos planteado, se procede a evaluar las propiedades del material mediante ensayos de impacto que medirán la resistencia mecánica (tensión) para cada muestra, con el fin de determinar la proporción más adecuada para que el material cumpla con los requerimientos de empaque.

2.3.5.1 Ensayo de resistencia mecánica. Este es un ensayo que evalúa las propiedades de tensión de un material, ya que permite ver qué tanto se deforma cuando es sometido a cierta fuerza⁸¹. Se aplica para evaluar la capacidad que tiene el material de soportar tensión sin deformarse y sin fracturarse, siguiendo el método de la norma ASTM D882-15 correspondiente a los ensayos de tensión para películas delgadas, haciendo uso del equipo TINIUS OLSEN ST10 suministrado por el SENA.

Después de realizar la evaluación de las propiedades del material aglomerado, se deberá ejecutar el diseño de experimentos para determinar la composición que mejor desempeño tuvo. Cuando se tenga la respuesta, es necesario establecer una relación con un material similar que pueda funcionar para un empaque, con el fin de comparar los resultados de las pruebas y de esta manera sus propiedades.

2.3.6 Planteamiento de balances de materia y energía para aglomerado. Se plantean dos balances de materia y energía que permitan evaluar el proceso, asumiendo que el sistema se encuentra en estado estable y que no hay reacción química. Por lo tanto, se plantea un balance de masa y de energía para el mezclado como una sola unidad y uno para pre-secado, prensado y secado del material, teniendo en cuenta el diagrama de la figura 16.

⁸¹ BILLMEYER, Fred W. Ciencia de los polímeros. New York. Reverté S.A. 1975. p. 132

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El proceso de experimentación se llevó a cabo con el fin de obtener un material compuesto de retazos de cuero y lignina que cumpliera con ciertas condiciones para ser usado como base en la elaboración de un empaque de calzado. A continuación se describen los procedimientos realizados y los resultados obtenidos en cada etapa.

3.1 OBTENCIÓN DE LIGNINA

Las hojas de maíz utilizadas para la extracción de lignina, fueron recolectadas en dos establecimientos comerciales de frutas y verduras ubicados en el municipio de Sibaté, Cundinamarca. Se recolectó 1Kg en peso húmedo de materia prima, la cual fue distribuida en muestras más pequeñas con el fin de facilitar el desarrollo de los procesos posteriores.

3.1.1 Adecuación de ameros. Las hojas de maíz utilizadas para la extracción de lignina, fueron recolectadas en el mercado local el municipio de Sibaté, Cundinamarca. Se recolectó 1Kg en peso húmedo de materia prima, la cual fue distribuida en muestras más pequeñas con el fin de facilitar el desarrollo de los procesos posteriores.

3.1.1.1 Desarrollo del diseño de experimentos para secado de ameros. El secado se realizó en el equipo referenciado en la sección 2.1.1, el cual mediante la creación de un ambiente de alta temperatura redujo el contenido de agua presente en los ameros. Ésta operación se realizó teniendo en cuenta las condiciones establecidas para cada bloque del diseño de experimentos, definidas en la tabla 4. Para tomar los datos correspondientes a la pérdida de peso, se seleccionaron 30 muestras que corresponden a 30 ameros, como se muestra en la figura 17. Una vez seleccionadas las muestras, se pesan y se registran los pesos en la columna correspondiente a peso inicial (g) de la tabla 7.

Figura 17. Selección de muestras de ameros para secado



Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Registro de datos de secado durante el diseño de experimentos

Bloque	Temperatura (°c)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida de peso (%)
1	55,8579	180	8,09	1,377	82,979
1	70	264,853	5,053	1,134	77,558
1	60	120	7,365	1,332	81,914
1	80	240	15,296	3,458	77,393
1	70	95,1472	2,775	0,57	79,459
1	80	120	3,93	0,778	80,204
1	84,1421	180	10,494	2,142	79,588
1	60	240	13,071	2,553	80,468
1	70	180	7,805	1,725	77,899
1	70	180	9,463	1,133	88,027
2	55,8579	180	9,063	1,466	83,824
2	70	264,853	4,536	1,081	76,168
2	60	120	5,783	1,158	79,976
2	80	240	16,718	3,328	80,093
2	70	95,1472	7,149	1,233	82,753
2	80	120	6,77	0,801	88,168
2	84,1421	180	8,296	1,802	78,279
2	60	240	10,243	2,084	79,654
2	70	180	9,228	1,14	87,646
2	70	180	5,69	1,302	77,118
3	55,8579	180	6,67	1,496	77,571
3	70	264,853	5,293	0,918	82,656
3	60	120	8,918	1,939	78,257
3	80	240	14,036	3,294	76,532
3	70	95,1472	6,743	1,157	82,841
3	80	120	4,177	0,904	78,358
3	84,1421	180	8,677	1,758	79,740
3	60	240	11,863	2,617	77,940
3	70	180	3,378	0,78	76,909
3	70	180	4,287	1,139	73,431

Fuente: elaboración propia

Las muestras quedaron distribuidas en ocho grupos de tres hojas y uno de seis para un total de 30, las cuales fueron separadas en bolsas con selle hermético según los tiempos y las temperaturas de cada experimento como se muestra en la figura 18, eliminando el aire que pudiera quedar dentro para evitar algún cambio en la humedad y por ende en el peso ya registrado. El secado de las muestras se realizó desde la temperatura menor hasta la mayor para facilitar el trabajo del horno al ir

ascendiendo gradualmente la temperatura para los diferentes experimentos, y de igual manera con los tiempos de secado, de menor a mayor.

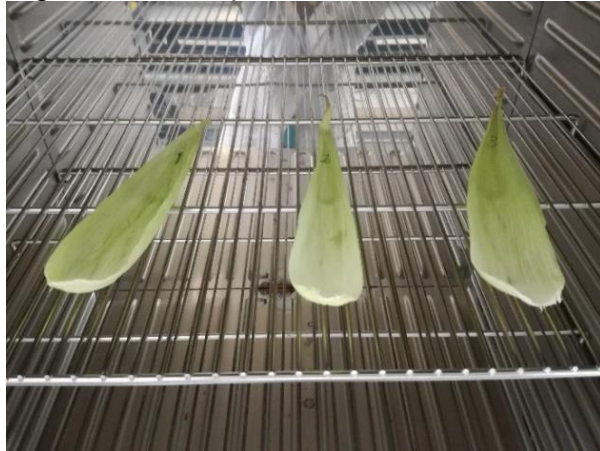
Figura 18. Almacenamiento de muestras según tiempo y temperaturas de secado



Fuente: elaboración propia

Se procedió a llevar los ameros al horno a la debida temperatura por el periodo de tiempo especificado en cada bloque, tal como se ilustra en la figura 19. Una vez terminado el tiempo para cada muestra, se retiraron del horno ya secas y se depositaron en bolsas con selle hermético reduciendo al máximo el contenido de aire dentro de las mismas, así como la figura 20 lo evidencia. Las muestras secas, fueron pesadas nuevamente registrando los datos en la columna correspondiente a peso final (g) de la tabla 7. Habiendo recolectado los datos de la operación de secado, se procede a calcular la pérdida de peso de cada muestra mediante la ecuación 1 referenciada en el apartado 2.1.1.1 del presente documento, para adicionar los datos a la tabla del diseño de experimentos del software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64, es decir a la tabla 4, para continuar con la ejecución del diseño y así llegar a un resultado coherente.

Figura 19. Secado para la muestra registrada en el punto 55.86°C con 3 horas



Fuente: elaboración propia

Figura 20. Muestras después del secado. a) 55,86°C; 3h. b) 70°; 1,58h. c) 70°C; 3h d) 70°C; 4,41h. e) 60°C; 2h. f) 80°C; 2h. g) 80°C; 4h. h) 84,14°C; 3h



a)

b)

c)



Fuente: elaboración propia

Una vez suministrados los datos de pérdida de peso, se procedió a analizar el diseño de experimentos, para obtener la superficie de respuesta en la cual se encuentra el punto en el que se maximiza la pérdida de peso a una temperatura y tiempo adecuados, buscando siempre que el proceso sea eficiente en términos energéticos.

El software realizó el análisis de los datos mediante un ANOVA simple, en el cual se evaluaron las siguientes hipótesis:

- No hay interacción significativa entre las variables de temperatura y tiempo en la pérdida de peso de la hoja de mazorca.
- Si hay interacción significativa entre las variables de temperatura y tiempo en la pérdida de peso de la hoja de mazorca.

La interacción del tiempo y la temperatura tienen una incidencia significativa en el proceso de retirar agua no ligada de las muestras, debido a que los procesos de secado están establecidos para la reducción en los tiempos de operación sin alterar la composición del mismo.

El análisis ANOVA es utilizado debido a que proporciona herramientas para determinar si las diferencias que existen en los resultados son significativas o no dependiendo del valor de P (coeficiente estadístico).

El software STATGRAPHICS generó los resultados del análisis de varianza y además proporcionó un análisis de los mismos. Los datos arrojados por el software, corresponden a R-cuadrada, R- cuadrada (ajustada por g.l), Error estándar, Error absoluto medio, Estadístico Durbin-Watson, P y a la Autocorrelación residual; los cuales se encuentran consignados en la tabla 8.

Tabla 8. Análisis de varianza para pérdida de peso

Variable	Valor
R-cuadrada	24,2538%
R- cuadrada (ajustada por g.l)	0,152783%
Error estándar	3,5389
Error absoluto medio	2,36797
Estadístico Durbin-Watson	2,29892
P	0,6251
Autocorrelación residual	-0,202901

Fuente: elaboración propia

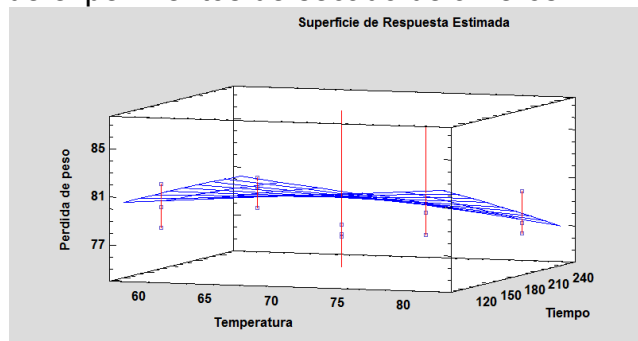
- R-Cuadrada indica el porcentaje de la variabilidad que el modelo explica con respecto a la variable de respuesta del experimento.
- R-cuadrada ajustada, es un parámetro de comparación de modelos estadísticos con diferente número de variables independientes.
- El error estándar muestra la desviación estándar de los residuos.
- El error medio absoluto (MAE) es el valor promedio de los residuos.
- El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.
- P, es la significancia de los efectos de las variables independientes sobre la variable de respuesta.

Un valor de $P=0,6251$ hace referencia a la no significancia de los efectos en el experimento, debido a que es un valor que se encuentra por encima de 0,05 lo cual indica que la variación de la temperatura y el tiempo no arroja cambios significativos en la pérdida de peso del material, confirmando la hipótesis nula. Este análisis no puede ser del todo cierto, porque si hay una variable con alta incidencia en un

proceso de secado, es la temperatura, por esto se puede determinar que las elegidas no generan una correlación directa, sino que solo una de las dos variables sería la que ejerza la mayor influencia dentro del proceso. Como puede verse en la figura 6, hay dos puntos altos que sobresalen del experimento, lo cual demuestra que la información no está sesgada en un punto únicamente.

Al ejecutar el diseño en el programa, se solicita la gráfica de la superficie de respuesta para ver los puntos más altos, es decir, los valores de temperatura y tiempo que maximizan la pérdida de peso en un proceso eficiente, gráfica que se encuentra consignada como figura 21.

Figura 21. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de secado de ameros



Fuente: software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

Lo que se puede observar en la figura 21, son los puntos máximos y los mínimos que se obtuvieron al ejecutar el diseño de experimentos para la operación de secado. Se esperaba que la respuesta estuviera sesgada a un solo punto para poder determinar el comportamiento al modificar las variables independientes. Los máximos representan que la pérdida de peso puede lograrse por dos caminos, es decir, aumentando la temperatura y disminuyendo el tiempo; o aumentando el tiempo y disminuyendo la temperatura. Por lo tanto, se confirma que la hipótesis nula es la que se cumple para este diseño, haciendo referencia a que no existe relación de las variables independientes sobre la variable de respuesta si son modificadas en el mismo sentido, es decir, que si se aumentan o se disminuyen los valores de tiempo y temperatura simultáneamente, no habrá cambios sobre la pérdida de peso de la hoja de maíz.

Con base al experimento realizado, se determina que la fase de secado de ameros deberá llevarse a cabo a una temperatura de 84,14°C durante un periodo de tiempo de una hora y 35 minutos, para lograr una reducción de peso considerable en las hojas de mazorca para los procesos que vienen a continuación. Los resultados arrojados por el software se encuentran consignados en la tabla 9.

Tabla 9. Resultado del diseño de experimentos para maximizar la pérdida de peso en el secado de ameros

FACTOR	BAJO	ALTO	ÓPTIMO
TEMPERATURA (°C)	55,8579	84,1421	84,1421
TIEMPO (MIN)	95,1472	264,853	95,1472

Fuente: software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

Para demostrar la validez del resultado del diseño de experimentos con superficie respuesta, se realizó un análisis factorial con ANOVA modificado para evaluar la interacción de las variables sobre el proceso; el cual ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la pérdida de peso.

Este método de análisis, también realiza varias pruebas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de agua no ligada de la hoja de maíz y además evalúa la significancia de las interacciones entre los factores del experimento. Para el caso particular del secado, se determina que el máximo valor de pérdida de peso en la hoja de maíz se da a condiciones de altas temperaturas y tiempos cortos, como se había mencionado en el análisis de superficie de respuesta.

Según el análisis se establece la existencia de una interacción entre los factores de temperatura y tiempo sobre la variable de respuesta, es decir, que al elevar la temperatura se ve un efecto en la disminución del tiempo para que se presente la mayor cantidad de pérdidas en el peso de las hojas.

3.1.1.2 Secado. Una vez fijadas las condiciones de secado, los ameros son separados en muestras de 200g cada una, como se ve en la figura 22. Durante la experimentación se hicieron necesarios ocho procesos de secado bajo las condiciones establecidas por el diseño de experimentos realizado.

Figura 22. Distribución de muestras para secado de ameros



Fuente: elaboración propia

Las muestras fueron llevadas al horno en cuatro grupos de dos muestras, como la figura 23 lo evidencia, esto debido a que el espacio dentro del horno no es suficiente para secar todas las hojas simultáneamente.

Figura 23. Disposición de las hojas de mazorca para el secado



Fuente: elaboración propia

Terminado el tiempo de secado, se realizó el registro de los pesos después de la operación en la tabla 10, evidenciando una pérdida de peso máxima del 82% para la muestra número 1.

Tabla 10. Registro de datos de la operación de secado de ameros

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida de peso (%)
1	200	36	82,000
2	200	47	76,500
3	200	45	77,500
4	202	59	70,792
5	200	50	75,000
6	204	46	77,451
7	202	44	78,218
8	230	49	78,696

Fuente: elaboración propia

Los porcentajes de pérdida de peso son relativamente altos, lo cual pudo deberse a que la cantidad de agua en los ameros varía de acuerdo al tamaño de los mismos y a la cercanía que tengan al fruto, ya que se observó que las hojas que se encuentran más al interior tienden a ser más gruesas y rígidas, mientras que las que se encuentran en la parte externa son más secas. Para el experimento se seleccionaron hojas que tuvieran características similares en cuanto a su tamaño o grosor, pero se presentaron ciertas diferencias, a pesar de que no fueron tan significativas, puesto que una remoción de agua de un 70% sigue siendo alta, considerando que el objetivo del secado no es reducir a cero este valor, sino disminuir el contenido de agua para evitar inconvenientes en el proceso de molienda. Por lo tanto, se considera que el secado realizado cumplió con la meta y permite proceder con la molienda.

3.1.1.3 Desarrollo de diseño experimental para proceso de molienda. La operación de molienda se realizó teniendo en cuenta las condiciones establecidas para cada bloque del diseño de experimentos, definidas en la tabla 2 de la sección 2.1.1.5. Las hojas secas utilizadas fueron las correspondientes al primer lote de secado, es decir, que para el desarrollo del diseño de experimentos de molienda, se tomaron las muestras 1, 2, 3 y 4 de secado, las cuales fueron separadas en bolsas con selle hermético con distintos pesos, como se ve en la figura 24.

Para realizar cada experimento, fue necesario pesarlás antes de la operación, datos que se encuentran registrados en la tabla 11.

Figura 24. Almacenamiento de muestras para molienda



Fuente: Elaboración propia

Una vez se han clasificado y rotulado las muestras de 1 a 30, se procede a realizar la molienda de cada muestra, teniendo en cuenta las condiciones fijadas para cada experimento, colocando la muestra en el molino y llevando a cabo la operación.

Una vez terminada la molienda, cada muestra fue llevada de nuevo a la bolsa resellable como se muestra en la figura 10, apreciándose la variedad de tamaños

de partícula obtenidos según las velocidades y los tiempos de molienda, las cuales fueron pesadas nuevamente para así poder calcular las pérdidas de material que pudieron darse a lugar durante el proceso con la ecuación 1, referenciada en el apartado 2.1.1.1 del presente documento, los datos están incluidos de igual manera en la tabla 11.

Figura 25. Almacenamiento de muestras molidas para diseño de experimentos



Fuente: elaboración propia

Finalizada la molienda, se procedió a realizar el tamizado con las mallas 10 y 80, correspondientes a gruesos y finos respectivamente, para separar las partículas según su tamaño y determinar si la cantidad predominante corresponde a los finos como se esperaba del diseño de experimentos.

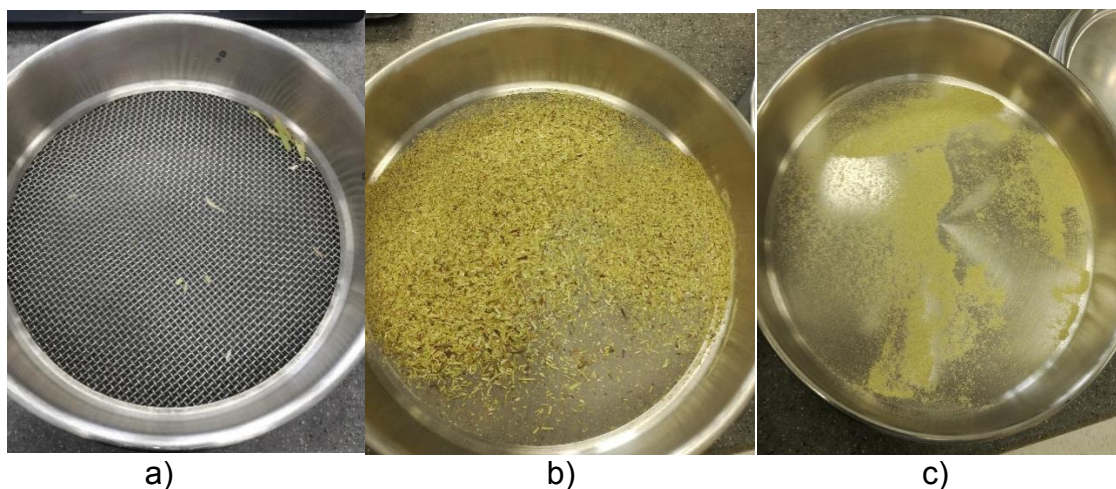
Tabla 11. Registro de datos de peso en molienda de ameros

Bloque	Velocidad del molino (rpm)	Tiempo (s)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% pérdida de peso
1	1800	20	7,784	7,683	1,298
1	1800	20	8,771	8,602	1,927
1	527,208	20	4,885	4,707	3,644
1	900	10	7,987	7,902	1,064
1	900	30	7,928	7,838	1,135
1	1800	34,1421	7,782	7,627	1,992
1	2700	30	7,932	7,849	1,046
1	1800	5,85786	8,234	8,139	1,154
1	3072,79	20	8,138	8,049	1,094
1	2700	10	10,113	10,021	0,910
2	1800	20	7,943	7,83	1,423
2	1800	20	7,779	7,663	1,491
2	527,208	20	4,363	4,209	3,530
2	900	10	7,873	7,776	1,232
2	900	30	7,73	7,639	1,177
2	1800	34,1421	7,94	7,839	1,272
2	2700	30	8,107	7,914	2,381
2	1800	5,85786	8,003	7,903	1,250
2	3072,79	20	8,201	7,963	2,902
2	2700	10	8,167	7,907	3,184
3	1800	20	8,101	8,004	1,197
3	1800	20	7,789	7,727	0,796
3	527,208	20	7,786	7,68	1,361
3	900	10	7,854	7,784	0,891
3	900	30	7,755	7,695	0,774
3	1800	34,1421	7,798	7,756	0,539
3	2700	30	7,729	7,667	0,802
3	1800	5,85786	4,3	4,055	5,698
3	3072,79	20	4,305	4,292	0,302
3	2700	10	4,373	4,352	0,480

Fuente: elaboración propia

El tamizado se realizó desde la muestra 1 hasta la 30, vertiendo el contenido de cada bolsa en la parte superior, agitando por 30 segundos, en los cuales se distribuyó el material a lo largo del complejo de tamices. En la figura 26 se muestra el contenido de los tamices para el primer experimento, evidenciando las cantidades recolectadas.

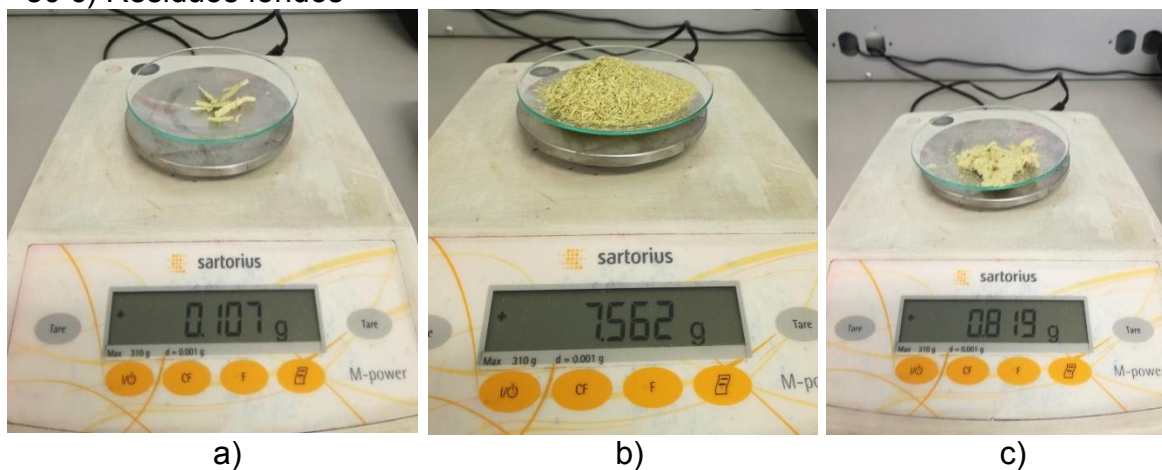
Figura 26. Para la muestra 1: a) Residuos malla 10 b) Residuos malla 80 c) Residuos fondos



Fuente: elaboración propia

Una vez tamizada cada muestra, se realizó el pesaje del contenido de cada tamiz como se evidencia en la figura 27, datos que fueron registrados en una tabla para cada muestra, las cuales se encuentran en el anexo A, mostrando también los pesos del tamiz 10, del 80 y de los fondos, de todo el material molido.

Figura 27. Pesaje para la muestra 1: a) Residuos malla 10 b) Residuos malla 80 c) Residuos fondos



Fuente: Elaboración propia

Después de tamizar y pesar cada muestra, se procede a hacer un paquete con todo el amero que se molió separándolo por tamiz. En la tabla 12, se muestran los pesos por malla, resaltando los que se encuentran en la número 80 puesto que será la empleada en el proceso de hidrólisis más adelante.

Tabla 12. Registro de datos de peso y % de retención por tamiz en el diseño de experimentos de molienda

Malla	Peso total (g)	% retención
10	8,97	4,17378195
80	191,981	89,3296357
FONDOS	13,962	6,49658234
Total	214,913	

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los datos registrados en cada una de las tablas presentes en el anexo A, se procede a tomar el registro del peso total de cada una después de tamizar para colocarlos en la tabla 13, y de esta manera calcular las pérdidas de material que pudieron darse a lugar durante el tamizado haciendo uso nuevamente de la ecuación 1 referenciada anteriormente, siendo 4,094% el valor más alto y 0,352% el más bajo.

Tabla 13. Registro de datos de peso en el tamizado de ameros

Muestra	Amero molido (g)	Amero tamizado (g)	Pérdidas por tamizado (%)
1	7,683	7,634	0,638
2	8,602	8,482	1,395
3	4,707	4,662	0,956
4	7,902	7,874	0,354
5	7,838	7,807	0,396
6	7,627	7,585	0,551
7	7,849	7,815	0,433
8	8,139	7,924	2,642
9	8,049	7,839	2,609
10	10,021	9,916	1,048
11	7,83	7,728	1,303
12	7,663	7,567	1,253
13	4,209	4,039	4,039
14	7,776	7,632	1,852

Tabla 13. (Continuación)

Muestra	Amero molido (g)	Amero tamizado (g)	Pérdidas por tamizado (%)
15	7,73	7,545	2,393
16	7,839	7,604	2,998
17	7,914	7,59	4,094
18	7,903	7,66	3,075
19	7,963	7,744	2,750
20	7,907	7,873	0,430
21	8,004	7,685	3,986
22	7,727	7,671	0,725
23	7,68	7,595	1,107
24	7,784	7,742	0,540
25	7,695	7,637	0,754
26	7,756	7,703	0,683
27	7,667	7,64	0,352
28	4,055	4,005	1,233
29	4,292	4,27	0,513
30	4,352	4,253	2,275

Fuente: elaboración propia

Habiendo hecho el tamizado de las 30 muestras y registrado los datos de los pesos de cada tamiz, se procede a completar la tabla 14 arrojada inicialmente por Statgraphics, con los pesos de cada muestra en la malla 80, registrados en el complejo de tablas del anexo A, con el fin de evaluar el arreglo que maximiza la producción del material de un tamaño de partícula mayor a 2 y menor a 0,18mm.

Tabla 14. Registro de datos de peso en el tamiz 80 para diseño de experimentos

BLOQUE	VELOCIDAD DEL MOLINO (rpm)	TIEMPO (s)	MATERIAL EN EL TAMIZ 80 (g)
1	1800	20	6,637
1	1800	20	7,559
1	527,208	20	2,712
1	900	10	7,198
1	900	30	6,913
1	1800	34,1421	6,391
1	2700	30	7,434
1	1800	5,85786	7,117
1	3072,79	20	7,594

Tabla 14. (Continuación)

BLOQUE	VELOCIDAD DEL MOLINO (rpm)	TIEMPO (s)	MATERIAL EN EL TAMIZ 80 (g)
1	2700	10	9,600
2	1800	20	7,104
2	900	10	6,788
2	900	30	6,952
2	1800	34,1421	6,665
2	2700	30	6,342
2	1800	5,85786	6,927
2	3072,79	20	6,926
2	2700	10	7,072
3	1800	20	7,123
3	1800	20	7,004
3	527,208	20	3,352
3	900	10	7,081
3	900	30	6,968
3	1800	34,1421	6,753
3	2700	30	6,757
3	1800	5,85786	3,175
3	3072,79	20	3,955
3	2700	10	3,776

Fuente: elaboración Propia

Al finalizar todas las mediciones correspondientes a molienda y tamizado, se procede a correr el diseño de experimentos en el software referenciado anteriormente, para obtener la superficie de respuesta en la cual se encuentra el punto en el que se maximiza la cantidad de ameros en el tamiz 80, buscando siempre que el proceso sea eficiente.

El software realizó el análisis de los datos mediante un ANOVA simple, en el cual se plantearon las siguientes hipótesis:

- No hay interacción significativa entre las variables de velocidad y tiempo de molienda en la reducción del tamaño de partícula de las hojas de mazorca.
- Si hay interacción significativa entre las variables de velocidad y tiempo de molienda en la reducción del tamaño de partícula de las hojas de mazorca.

Al igual que en el secado, la interacción del tiempo y la velocidad del molino tienen una incidencia significativa en el proceso de reducción de tamaño de partícula, debido a que los procesos de molienda están configurados para reducir tiempos de operación sin modificar la composición del mismo.

En este diseño de experimentos para molienda de ameros, se realiza el análisis de los datos nuevamente mediante un ANOVA debido a las razones ya expuestas en la sección 3.1.1.1.

En esta ocasión el software STATGRAPHICS generó los resultados y el análisis del modelo de la misma forma que para el secado. Los datos arrojados por el software, corresponden a R-cuadrada, R- cuadrada (ajustada por g.l), Error estándar, Error absoluto medio, Estadístico Durbin-Watson, P y a la Autocorrelación residual; los cuales se encuentran consignados en la tabla 15.

Tabla 15. Análisis de varianza para peso tamiz malla 80

Variable	Valor
R-cuadrada	36,8246
R- cuadrada (ajustada por g.l)	16,7234
Error estándar	1,6587
Error absoluto medio	1,09416
Estadístico Durbin-Watson	1,62429
P	0,0516
Autocorrelación residual	0,14217

Fuente: elaboración propia

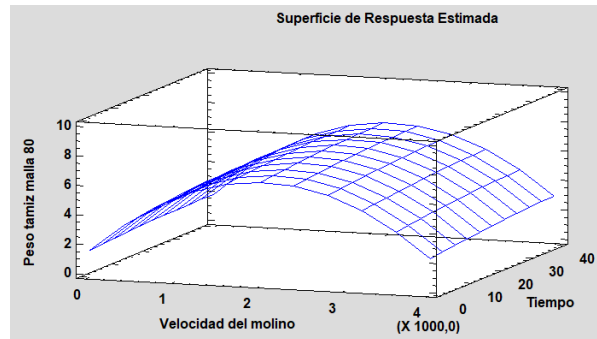
Cada variable tiene su significado dentro del análisis del diseño experimental, el cual se encuentra referenciado en la sección 3.1.1.1.

Un valor de $P=0,0516$ indica la no significancia de los efectos en el experimento, ya que al ser ligeramente mayor a 0,05 la variación de la velocidad del molino y el tiempo no arrojan cambios significativos en el aumento de material en el tamiz 80, confirmando la hipótesis nula.

Un valor de $P=0,0516$ hace referencia a la no significancia de los efectos en el experimento, debido a que es un valor ligeramente mayor a 0,05 lo cual indica que la variación de la velocidad y el tiempo no arroja cambios significativos en la reducción de tamaño del material, confirmando la hipótesis nula. De este análisis se puede determinar que las variables seleccionadas no generan una correlación directa, sino que al igual que en secada solo una de las dos sería la que ejerza la mayor influencia dentro del proceso. El comportamiento de la superficie de respuesta es similar al del secado como se muestra en la figura 28, en la cual se evidencian dos puntos altos que sobresalen del experimento, lo cual demuestra que la información esta sesgada en un punto únicamente.

Al ejecutar el diseño en el programa, se obtiene la gráfica de superficie respuesta para ver los valores de velocidad y tiempo que maximizan la cantidad de material en el tamiz 80 en un proceso eficiente.

Figura 28. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de molienda de ameros



Fuente: software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

En la figura 28, se evidencian los puntos máximos y los mínimos que se obtuvieron al ejecutar el diseño de experimentos para la operación de molienda de hojas de maíz. Al igual que para secado, se esperaba que la respuesta estuviera sesgada a un solo punto para poder determinar el comportamiento del proceso al modificar las variables independientes.

Los máximos representan que el aumento de la cantidad de amero en el tamiz 80 puede lograrse por dos caminos, es decir, aumentando la velocidad del molino y disminuyendo el tiempo; o aumentando el tiempo de la molienda y disminuyendo la velocidad. Por lo tanto, se confirma el cumplimiento de la hipótesis nula para este diseño, haciendo referencia a que no existe relación de las variables independientes sobre la variable de respuesta si son modificadas en el mismo sentido, es decir, que si se aumentan o se disminuyen los valores de tiempo de molienda y velocidad simultáneamente, no habrá cambios sobre la cantidad de material de tamaño de partícula menor a 2mm y mayor a 0.18mm.

Con base al experimento realizado, se determina que la fase de molienda de ameros deberá llevarse con una velocidad de 2107,67 rpm durante un periodo de tiempo de 34,14 segundos, para lograr una reducción de tamaño de partícula de 0,180 mm para las hojas de maíz, teniendo en cuenta que mejora el desarrollo de los procesos que vienen a continuación. Resultados que se encuentran en la tabla 16, arrojada por el software.

Tabla 16. Respuesta del diseño de experimentos de secado de ameros

FACTOR	BAJO	ALTO	ÓPTIMO
Velocidad molino (rpm)	527,208	3072,79	2107,67
Tiempo (s)	5,85786	34,1421	34,1421

Fuente: software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

Al igual que para la fase de secado, se realizó un análisis factorial con ANOVA modificado para evaluar la interacción de las variables sobre el proceso; el cual ejecuta un análisis de varianza de varios factores para la cantidad de material en el tamiz 80. Esto se realiza con el fin de corroborar la información dada por la superficie de respuesta.

Este método de análisis, también realiza varias pruebas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la reducción del tamaño de partícula de la hoja de maíz y además evalúa la significancia de las interacciones entre los factores del experimento. Para el caso particular de la molienda, se determina que el máximo valor de peso en el tamiz 80 se da a condiciones de altas velocidades y tiempos cortos, como se había mencionado en el análisis de superficie de respuesta.

Según el análisis se establece la existencia de una interacción entre los factores de velocidad y tiempo de molienda sobre la variable de respuesta, ya que al aumentar la velocidad del molino se ve un efecto en el tamaño de partícula si los tiempos de molienda son más cortos.

3.1.1.4 Molienda. Después de evaluar la molienda con el diseño de experimentos, se procede a tomar el material seco restante, es decir, las muestras 5, 6, 7 y 8 para realizar la molienda bajo las condiciones ya determinadas por el diseño. Las hojas ya separadas fueron pesadas antes y después de ser llevadas al molino, registrando los datos de peso en la tabla 17, así como también las pérdidas calculadas con la ecuación 1 al igual que en el secado.

Tabla 17. Registro de datos de peso y pérdidas de material en la operación de molienda para el segundo lote de hojas secas

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdidas (%)
5	50	48,215	3,570
6	46	39,345	14,467
7	44	41,774	5,059
8	49	43,72	10,776

Fuente: elaboración propia

Al terminar la molienda, se procedió a tamizar la muestra en su totalidad, puesto que el material finalmente va a ser mezclado, entonces se realiza el proceso como se muestra en la figura 29 y se registran los datos de peso y % de retención de cada tamiz en la tabla 18, cumpliendo lo que se esperaba del diseño debido a que se maximizó el % en el tamiz 80 siendo este de 74, 786%.

Figura 29. Tamizado del segundo lote de hojas secas. Izquierda: Residuo de los fondos; Centro: Residuos del tamiz 80; Derecha: Residuos del tamiz 10



Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Registro de datos de tamizado para el segundo lote de hojas secas

Malla	Peso total (g)	% retención
10	6,339	2,94956564
80	160,726	74,7865415
FONDOS	14,331	6,66827972
Total	181,396	

Fuente: elaboración propia

Una vez finalizadas las operaciones de secado, molienda y tamizado de las muestras de hojas de mazorca seleccionadas, se procedió a realizar los procesos de hidrólisis para la obtención de lignina. Para ello, se totaliza la muestra de amero, es decir, que para los procesos posteriores se cuenta con 363,377g de amero seco y molido.

3.1.2 Hidrólisis y extracción para obtención de lignina. Siguiendo lo planteado, se realizó una hidrólisis alcalina al amero haciendo uso de KOH y amoniaco diluido; y una posterior acidificación con ácido sulfúrico para obtener el aglomerante deseado. Se obtuvieron aproximadamente 14g de lignina, para la cual fueron necesarias 13 repeticiones, haciendo uso de la totalidad del material lignocelulósico previamente adecuado. El desarrollo del proceso se dividió en dos etapas, las cuales se describen a continuación.

3.1.2.1 Pulpeo para la obtención de licor negro. Los lotes de hojas de maíz tienen variaciones de acuerdo a los lugares de recolección y los tiempos entre operaciones de adecuación, por tal motivo, se decidió manejar cada muestra por separado para la hidrólisis, siendo las siete primeras muestras de lignina las correspondientes al primer lote de ameros, mientras que de la muestra 8 hasta la 13 se obtuvo lignina del segundo lote.

Para el desarrollo del experimento, fueron necesarios 25g de amero; 1,25g de KOH y una solución de amoniaco al 4,2% v/v; como se muestra en la figura 30. Para lograr el porcentaje de la solución de NH_4OH deseado, son necesarios 6,25g de NH_4OH para obtener 160ml de solución. Por lo tanto se hace uso de la ecuación 5 para determinar el %m/v de la solución.

$$\% m/v = \frac{\text{Peso del Sólido}}{\text{Volumen de la solución}} * 100\% \quad (5)$$

Quedando de la siguiente manera:

$$\% m/v = \frac{6,25g NH_4OH}{160ml} * 100\% = 3,91\%$$

Ahora, para determinar el peso equivalente a los 160ml de la solución, se hace uso de la ecuación 6:

$$g(sln) = ml(sln) * \frac{\rho_{NH_4OH}}{1ml sln} \quad (6)$$

Dando como resultado:

$$g(sln) = 160ml sln * \frac{0,89g/ml}{1ml sln} = 142,4gNH_4OH$$

Teniendo los datos en términos de peso, se procede a calcular el %p/p de la solución mediante la ecuación 7.

$$\% p/p = \frac{\text{Peso Sóluto}}{\text{Peso Solución}} * 100\% \quad (7)$$

$$\% p/p = \frac{6,25g \text{ NH}_4\text{OH}}{142,4g \text{ NH}_4\text{OH}} * 100\% = 4,38\%$$

Teniendo en cuenta que el amoníaco suministrado está al 30%p/p de concentración, y habiendo unificado unidades de las soluciones, se procede a realizar el cálculo del volumen de NH₄OH necesario para obtener una solución al 4,38% p/p, con la siguiente ecuación:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (8)$$

Donde C₁ es la concentración a la que se encuentra el NH₄OH inicialmente; C₂ es la concentración a la que se quiere llegar y V₂ es el volumen final que este caso es de 160ml. Por lo tanto el volumen 1 es el que se deberá tomar de la solución inicial para llevarla al 4,38%, y despejando la ecuación 8:

$$V_1 = \frac{C_2 * V_2}{C_1} \quad (9)$$

$$V_1 = \frac{0,0438 * 160ml}{0,3} = 23,36ml \text{ NH}_4\text{OH}(30\%)$$

Teniendo el volumen de NH₄OH necesario para 160ml de solución, se decide realizar el cálculo correspondiente a 200ml, puesto que no se dispone de un implemento en el laboratorio que permita aforar a 160ml y además porque existe una posibilidad de que se requiera más volumen por el tipo de material lignocelulósico que se emplea en este proyecto. Haciendo uso de la ecuación 11, se determina que para aforar a 200ml se requiere de 29,2ml de la solución inicial de NH₄OH (30%).

Figura 30. a) Pesaje de ameros. b) Pesaje de KOH. c) Preparación de NH₄OH al 4,38%



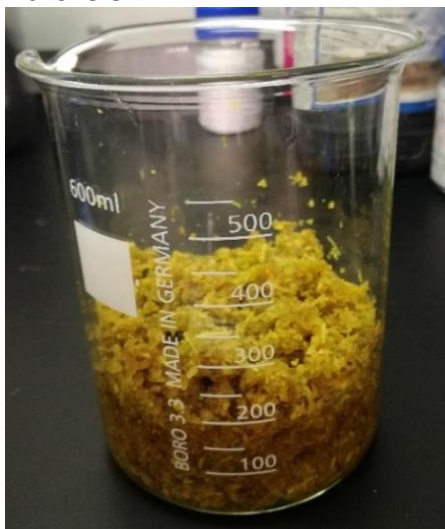
a) Fuente: elaboración propia

Los elementos referenciados en la figura 31 fueron colocados en un solo recipiente, el cual a su vez se encontraba puesto sobre una plancha de calentamiento que fue llevada hasta los 155°C y los 2,5 rpm de agitación inicialmente por un periodo de 60 minutos y finalmente uno de reposo de 45 minutos.

Lo que se esperaba de la mezcla es que visualmente hubiera cierta fluidez del material sólido en la solución, pero la cantidad de hidróxido de amonio no fue suficiente, por lo tanto, lo que se creó fue una masa sin movimiento, como se muestra en la figura 31.

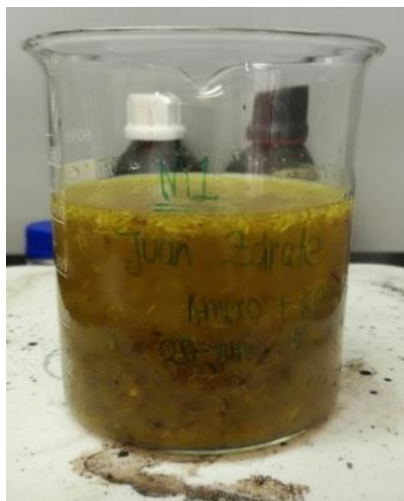
Se observó que el material lignocelulósico empleado absorbió todo el líquido de la mezcla, tal como se predijo en el momento de realizar el cálculo del volumen requerido. El comportamiento pudo deberse a que las hojas de mazorca habían sufrido un proceso de secado inicialmente y los espacios que inicialmente eran ocupados por moléculas de agua se encontraban vacíos, de modo que su capacidad de absorción era alta. Por lo tanto, se decidió duplicar la cantidad de hidróxido de amonio suministrada, es decir, que fueron necesarios 400ml de NH₄OH para que la mezcla tuviera la fluidez esperada, así como se muestra en la figura 32, siendo el momento preciso para colocarla bajo las condiciones de temperatura y agitación anteriormente definidas.

Figura 31. Mezcla con 200ml de NH_4OH para proceso de hidrólisis



Fuente: elaboración propia

Figura 32. Mezcla con 400ml de NH_4OH para proceso de hidrólisis



Fuente: elaboración propia

Una vez terminado el tiempo de hidrólisis, la mezcla evidenció una separación en dos capas, como quedó registrado en la figura 33. Los 45 minutos de reposo sirvieron para que el sólido decantara y permitiera ver mejor las fases, la sólida conformada por la pulpa celulósica y la líquida en la cual se encuentra la lignina

solubilizada, esta última capa es lo que se conoce como el licor negro residual en la industria papelera⁸².

Figura 33. Mezcla después del proceso de hidrólisis



Fuente: elaboración propia

El color marrón que se evidencia, es gracias a la presencia de la lignina, que en ese momento se encontraba solubilizada; mientras que la pulpa obtenida (fase sólida) presenta una textura gelatinosa gracias a la ausencia de lignina en su estructura. De modo que la parte de interés se encontraba soluble en el licor negro, se procedió a realizar otro proceso de separación con filtro de matraz de kitasato y bomba de vacío a una presión de -0,5bar, con el fin de dejar el licor libre de partículas de celulosa y hemicelulosa, como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Licor negro filtrado y almacenado para extracción



Fuente: elaboración propia

⁸² TORRASPAPEL, S.A. Fabricación del papel. En: Lecta Group. Barcelona. 2008. p. 5.

Como proceso complementario, la pulpa fue lavada con abundante agua hasta remover completamente el NH_4OH , característica que se veía reflejada en el color amarillo del agua de lavado. Finalmente se secó y se almacenó para ser usada en otros procesos del centro de manufactura de textil y cuero del SENA.

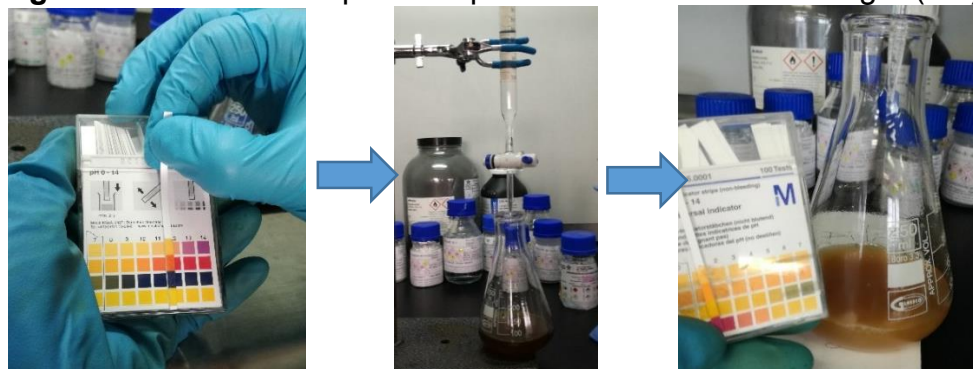
Se obtuvieron 13 muestras de licor negro los cuales fueron utilizados para la extracción de la lignina. Los datos de cada muestra se encuentran resumidos en la tabla 19 al final de este apartado junto con los porcentajes de rendimiento para cada experimento.

3.1.2.2 Extracción de lignina del licor negro. El proceso de extracción de lignina establecido se realiza en muestras de 70ml de licor negro cada una. Teniendo en cuenta que el volumen de cada licor se encuentra entre los 150 y 200ml, se obtuvo un promedio de 3 precipitaciones por cada muestra aproximadamente, siendo necesarios 3ml de H_2SO_4 concentrado por cada una para lograr un pH igual a 2.

El volumen de licor negro fue medido con una probeta de 100ml antes de ser vertido al Erlenmeyer. Para la muestras 1, 2 y 3 de licor, se usó ácido sulfúrico con una concentración muy baja (1N), por lo tanto, para lograr la precipitación de lignina, fueron necesarios 20ml del mismo para disminuir el pH hasta 2. Esto, debido a un descuido en el proceso de etiquetado de los reactivos, en donde ya se había realizado la respectiva dilución para ser usada en otros procesos.

La medición de pH se realiza antes y después de adicionar el ácido sulfúrico a cada muestra. Para todos los casos de esta experimentación el pH inicial fue igual a 11, los cuales fueron llevados a un pH final de 2, como ya se describió anteriormente; dichas mediciones son ilustradas en la figura 35 para la muestra 1, teniendo en cuenta que para las demás son iguales, solo se coloca la primera para resumir.

Figura 35. Medición de pH de la primera muestra de licor negro (M1)

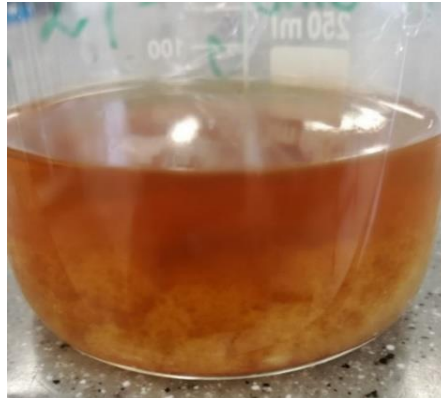


Fuente: elaboración propia

A pesar de tener un ácido extremadamente diluido, el proceso por goteo funcionó con mayor cantidad, pero se logró llevar la muestra a un pH igual a 2 observando

así los cambios en las fases creadas, siendo la fase sólida la correspondiente a la lignina precipitada, como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Precipitación de lignina con 20ml de H_2SO_4 (1N)



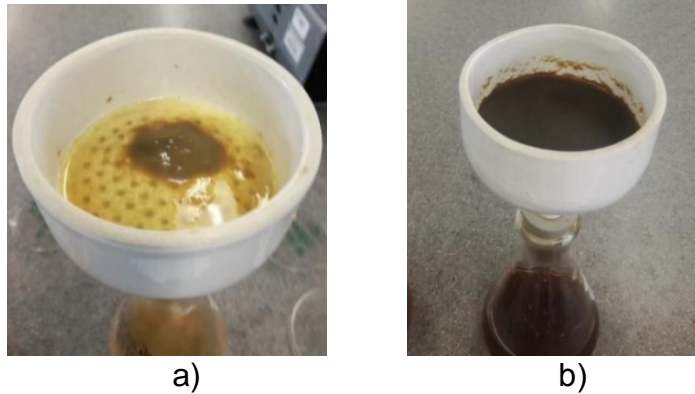
Fuente: elaboración propia

Para el primer experimento que se muestra en la figura 37, en el fondo del recipiente sobre los 15ml de H_2SO_4 , se comienza a ver una capa blanca que al agitar se solubiliza, hasta que ya sobre los 20ml se observan partículas blancas que quedan suspendidas, por lo tanto en ese momento hay un cambio notorio del color del licor, lo que permite determinar cualitativamente que el pH ha disminuido, por tal razón se realizó la medición, la cual permitió comprobar que el pH ahora se encontraba en un valor de 2 (ver figura 36), el ideal para que la lignina precipite según el artículo de referencia.

Después de verificar que las condiciones del licor son propias para la precipitación de lignina, se procede a dejar en reposo la muestra, para que el sólido suspendido decante y permita una mejor filtración. El filtro de matraz de kitasato fue usado nuevamente en esta fase del proceso, pero sin la bomba de vacío ya que si se hace uso de ella, las partículas de lignina atraviesan el filtro significando una pérdida importante de la sustancia de interés. Por lo tanto, el filtrado de lignina se realizó por efecto de la gravedad, implicando que cada muestra debía dejarse filtrando de un día para el otro.

En la torta de filtrado se obtuvo la lignina, que para el caso de las tres primeras muestras fue muy poca, debido a que en medio del filtrado con vacío se perdió licor al conectar y desconectar las mangueras del matraz, además que según Ramírez y Enríquez, la mayor cantidad de lignina se obtiene con altas concentraciones de ácido, lo cual se comprueba desde la muestra 4 hasta la 13. Esta afirmación se comprueba cualitativamente en la figura 37, en la cual se muestra la torta de filtrado de la muestra 1 y la muestra 13.

Figura 37. Torta de filtrado. a) M1 b) M13



Fuente: Elaboración propia

Además de la significativa diferencia en cantidad, se observó un color más oscuro en la muestra 13 que pudo deberse al tiempo de reposo después de la cocción, a la misma cantidad obtenida o a las concentraciones de ácido modificadas para la precipitación. Además, el proceso de hidrólisis tuvo una modificación con respecto a la concentración de hidróxido de amonio a partir de la muestra número 8, ya que se disminuyó exactamente a la mitad con el fin de mejorar el rendimiento y reducir costos del proceso. Pasado el tiempo de filtración, se procedió a pasar cada muestra de lignina del filtro a un vidrio reloj, para ser llevadas al horno de secado.

3.1.3 Secado de lignina. Las muestras de lignina obtenidas a partir de la hidrólisis, fueron puestas en el horno mencionado en el apartado 2.1.2.3 del presente documento. El secado se realizó de a 3 muestras por un periodo de 24 horas, con el fin de que fuera un proceso rápido y eficiente; en la figura 38 se puede observar el estado de la lignina en el vidrio reloj, después del secado.

Al estar libre de líquido, la lignina quedó adherida al vidrio, por lo tanto fue necesario realizar un raspado con espátula para obtener la lignina en forma de polvillo. Cada muestra fue pesada y almacenada en cajas Petri como se muestra en la figura 39, para el respectivo análisis y posteriormente para su uso en la elaboración del aglomerado.

Figura 38. Muestra 4 de lignina después del secado



Fuente: elaboración propia

Figura 39. Lignina obtenida para cada una de las 13 muestras



Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Calculo de rendimiento del proceso de hidrólisis para cada muestra

Muestra	[nh4oh] (%)	[h2so4]	H2so4 (ml)	Lignina obtenida (g)	Rendimiento (%)
M1	4,38	1N	20	0,216	12,71
M2	4,38	1N	20	1,206	70,94
M3	4,38	1N	20	0,222	13,06
M4	4,38	98%	3	2,018	118,71
M5	4,38	98%	3	1,447	85,12
M6	*2,19	98%	2	1,699	99,94
M7	4,38	98%	3	1,049	61,71
M8	*2,19	98%	2	0,954	56,12
M9	*2,20	98%	2	0,714	42

Tabla 19. (Continuación)

Muestra	[nh4oh] (%)	[h2so4]	H2so4 (ml)	Lignina obtenida (g)	Rendimiento (%)
M10	*2,21	98%	2	1,34	78,82
M11	*2,22	98%	2	1,332	78,35
M12	*2,23	98%	2	1,094	64,35
M13	*2,24	98%	2	1,093	64,29
TOTAL LIGNINA OBTENIDA				14,384	

Fuente: elaboración propia

Al finalizar los 13 experimentos se obtuvo un total de 14,384g de lignina, de los cuales se extrajeron 0,010g para el análisis FTIR, como se muestra en la figura 40.

Figura 40. Muestras de lignina para FTIR



Fuente: elaboración propia

3.1.4 Análisis por Espectroscopia Infrarrojo. En la tabla 20 se evidencia el peso retirado por cada muestra para realizar las pruebas de FTIR, las cuales permitieron identificar si lo que se obtuvo de la hidrólisis es efectivamente lignina.

Para saber si las muestras corresponden a lignina, las pruebas de FTIR se realizan con un blanco que corresponde a lignina comercial, la cual se consiguió de las instalaciones de la Universidad Nacional, para que de esta manera se puedan comparar los picos arrojados para cada muestra determinando así la pureza de la lignina obtenida.

Inicialmente, se caracterizó el blanco, y cada una de las muestras colocándolas sobre el disco de diamante ejecutando el software, como se muestra en la figura 41.

Tabla 20. Peso de cada muestra para FTIR

Muestra	Ftir (g)
M1,2,3	0,014
M4	0,014
M5	0,015
M6	0,031
M7	0,013
M8	0,014
M9	0,014
M10	0,027
M11	0,019
M12	0,013
M13	0,018

Fuente: elaboración propia

Figura 41. FTIR para lignina obtenida



Fuente: elaboración propia

Una vez finalizado el análisis, se obtuvieron las gráficas de absorbancia contra longitud de onda, en las cuales se observan unos patrones con picos altos y bajos dependiendo de la composición de cada muestra, en la figura 42 se pueden observar las gráficas correspondientes al blanco y a la muestra 1, mientras que las que corresponden a las demás muestras, se encuentran en el anexo B.

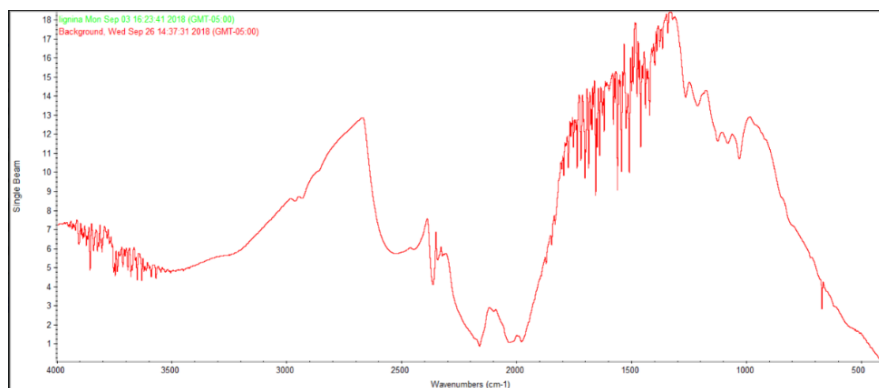
Lo que se pudo determinar cualitativamente es que existe un patrón muy marcado en las gráficas de todas las muestras de la lignina obtenida, pero no se asemeja mucho al de la lignina comercial, siendo esta última la que se encuentra en el espectro de la figura 42a. Viendo las dos gráficas, se estable que hay algunos picos que se encuentran en las mismas longitudes de onda, pero son muy pocos.

El fenómeno presentado no permite determinar que la lignina obtenida pertenece al mismo tipo de la lignina seleccionada como blanco, independientemente de la variación de concentraciones de amoniaco y ácido sulfúrico a las que fueron sometidas.

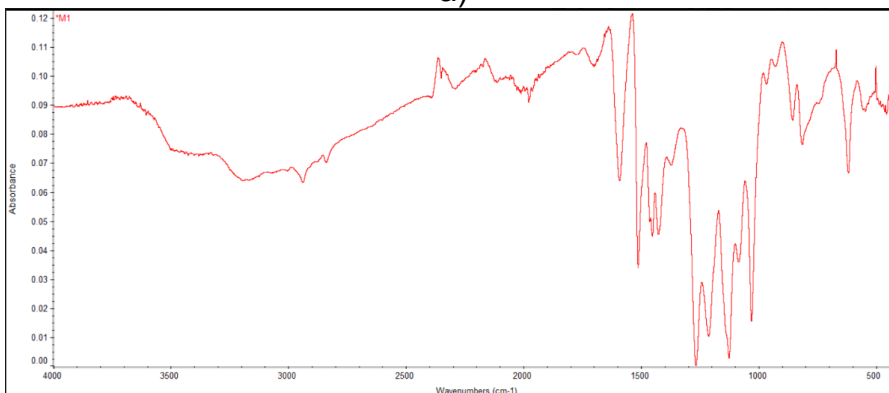
La incertidumbre se genera a partir de la forma de obtención de cada una de las ligninas, si bien para la 42b fue método alcalino, la 42a pudo haberse extraído por medio ácido u otros de los que existen, lo cual impide una mayor similitud entre los picos del estudio por espectroscopia de infrarrojo; por este motivo fue necesario realizar un análisis comparativo más profundo con respecto a la interpretación de los picos más representativos en cada gráfica, mediante una comparación con otro estudio realizado.

Los picos altos y bajos se forman cuando el haz de luz que emite el equipo hace vibrar los enlaces de cada molécula a diferentes longitudes de onda, graficando de esta manera los que se logran identificar en el proceso.

Figura 42. FTIR para lignina obtenida a) Blanco b) M1



a)



b)

Fuente: Software Spetra de Thermo Fisher

Para el caso mostrado en la figura 42, el software determinó un grado de coincidencia de la muestra 1 del 76.88 para un rango de longitud de onda de 1400 a 400 con el blanco, siendo esta una de las muestras con mayor similitud con la lignina comercial.

Por otro lado, dentro del análisis se encuentran coincidencias entre valores de longitud de onda de 4000 a 147,5 con espectros de compuestos de nitrofenil y sulfato de mescalina en porcentajes de 43,54 y 41,88 respectivamente. La posible aparición de los dos compuestos, puede deberse a las reacciones que pudieron darse a lugar durante la hidrólisis y extracción de la lignina, por acción del hidróxido de amonio (NH₄OH) y del ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Ahora bien, para establecer si la muestra 1 presentó todos los grupos funcionales, se compara con un estudio realizado a una muestra de lignina de caña de azúcar, en el cual se presentaron los valores de longitud de onda, a las que vibran los compuestos más representativos de la molécula de lignina (Ver tabla 21).

Tabla 21. Longitudes de onda para grupos funcionales de lignina

Grupo funcional	Longitud de onda
Anillo de fenilo de las macromoléculas de lignina	1605 cm ⁻¹ y 1517 cm ⁻¹
Hidroxilos	3413 cm ⁻¹
Grupos metileno y metilo	2940 cm ⁻¹
Grupo metoxi aromático	2850 cm ⁻¹
Aldehído o cetona carbonilo	1711 cm ⁻¹
Enlaces CO	1260 cm ⁻¹ y 1219 cm ⁻¹
SO ₃	1040 cm ⁻¹

Fuente: Extracción de lignina del bagazo de caña de azúcar y su modificación en un dispersante de alto rendimiento para formulaciones de plaguicidas, Zhili Li; Yuanyuan Ge⁸³.

La figura 43a, es la gráfica que representa el FTIR de la lignina de caña de azúcar, la cual se convierte en un punto de comparación con la figura 43b obtenida de la muestra 1 de lignina de ameros, en la cual se subrayan los puntos de los grupos representativos de la molécula de lignina, de acuerdo a lo establecido en la tabla 21.

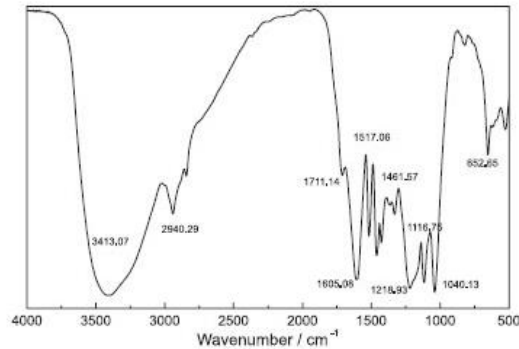
De acuerdo a la información de la tabla 21 y de la figura 43a, se establece la existencia de los siguientes grupos: hidroxilos, metileno y metilo, aldehído o cetona carbonilo, SO₃ y anillo de fenilo; siendo este último uno de los más importantes debido a que es conocido por ser el núcleo de la macromolécula de lignina⁸⁴, el cual

⁸³ ZHILI LI y YUANYUAN GE. Extraction of Lignin from Sugar Cane Bagasse and its Modification into a High Performance Dispersant for Pesticide Formulations. En: Braz. Chem. Soc. Vol. 22. No. 10. 2011. p. 1869.

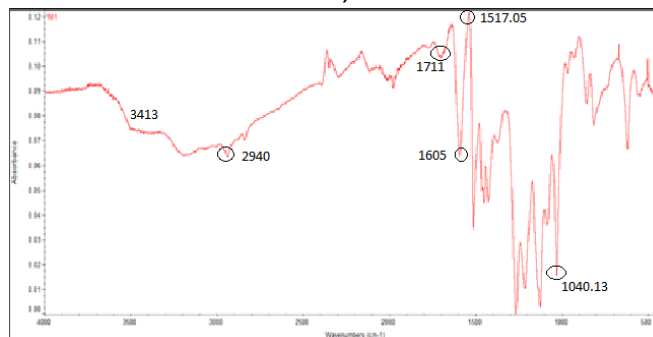
⁸⁴ ZHILI LI y YUANYUAN GE. Op. cit., p. 1869.

se encuentra en el intervalo de 1605 y 15417.05, permitiendo afirmar que la sustancia extraída de las hojas de maíz corresponde a lignina, a pesar de que todos los picos no sean similares en ambos espectros.

Figura 43. Comparativa de FTIR de lignina a) de caña de azúcar b) Ameros



a)



b)

Fuente: a) Extracción de lignina del bagazo de caña de azúcar y su modificación en un dispersante de alto rendimiento para formulaciones de plaguicidas, Zhili Li; Yuanyuan Ge. b) Spetra de Thermo Fisher

3.2 ADECUACIÓN DE RETAZOS DE CUERO

La segunda fase del desarrollo experimental consistió en seleccionar los retazos de cuero provenientes del taller de corte y confección del centro de manufactura textil y cuero del SENA, para llevar a cabo los procesos de adecuación bajo ciertas condiciones que les permitieran ser usados en la construcción del material aglomerado. A continuación, se describen los procesos que fueron necesarios para obtener un cuero que cumpliera con las características necesarias para llevar a cabo el proceso de polimerización con la lignina obtenida.

3.2.1 Selección de retazos de cuero. El paso por cada taller de corte y confección permitió recolectar 7,3Kg de cuero de desbaste de diferentes clases, lo cuales fueron pesados en una balanza, como se muestra en la figura 44.

El cuero que se recolectó es producto de una maquina desbastadora convencional, la cual se usa para reducir el grosor del cuero antes de ensamblar o cocer en el proceso de elaboración de calzado o de artículos de marroquinería⁸⁵. Teniendo en cuenta que estos retazos son de corte muy fino, permiten un fácil manejo en la operación de reducción de tamaño, ya que muchos de ellos se rompen manualmente con el mínimo de fuerza.

Figura 44. Cuero recolectado del taller de corte y confección del centro de manufactura textil y cuero del SENA



Fuente: elaboración propia

3.2.2 Caracterización del material. Una vez recolectado y pesado el material, se procedió a identificar los retazos más gruesos que no podían romperse manualmente y fueron separados ya que al ser llevados al molino podían causar atascamientos o daños del equipo porque requerirían uno de mayor potencia para reducir su tamaño. Proceso que se evidencia en la figura 45.

⁸⁵ RAMÍREZ H., Ángela M. Reutilización de retales de cuero para la elaboración de una línea de productos de marroquinería. Diseñador industrial. Universidad Católica popular del Risaralda. Pereira.2009.

Al ser material de residuo, estaba contaminado con otros elementos de desecho generados en el centro, por lo tanto, además de seleccionar los retazos para la molienda, se realizó una limpieza de todo el material recolectado de forma manual.

Figura 45. Separación del cuero por grosor



Fuente: elaboración propia

3.2.3 Limpieza de los retazos de cuero seleccionados. Para los retazos de cuero seleccionados no fue necesario un proceso de limpieza como el que se había planteado inicialmente, debido a que como era cuero de desbaste, se encontraba a punto de desmoronarse. De modo que el proceso de limpieza consistió en retirar los restos de basura como retazos de tela, vasos plásticos, pitillos, y otros elementos que se encontraban entre el cuero; con el fin de homogenizar el estado en el que se encontraban los retazos, dejando únicamente los retazos de cuero más adecuados para la molienda, como se muestra en la figura 46.

Figura 46. Retazos de cuero seleccionados después de la limpieza



Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la figura 47 se muestran los retazos seleccionados, los cuales fueron cortados en pedazos más pequeños para facilitar los procesos de molienda de cada muestra.

Figura 47. Retazos de cuero seleccionados para molienda



Fuente: elaboración propia

3.2.4 Proceso de molienda. La molienda de cuero se llevó a cabo en el mismo equipo que se usó para la molienda de las hojas de maíz, el cual se encuentra referenciado en el apartado 2.1.1.4.

Se tomaron muestras iniciales de 20g pero al tener tanto material para moler se prefirió aumentar las muestras a 30g de cuero cada una, las cuales fueron almacenadas en bolsas resellables.

Después de clasificar el material, se llevó a cabo la molienda con la máxima velocidad debido al tipo de material, durante un periodo de tiempo aproximado de 10 segundos, dejando como resultado un cuero totalmente pulverizado como se muestra en la figura 48; la cantidad es la misma, pero se observa un aumento en el volumen de la muestra.

Figura 48. Cuero molido



Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Registro de datos de molienda de cuero

Muestra	Retazos de cuero (g)	Cuero molido (g)	Pérdidas por molienda (%)
1	30,002	27,42	8,606
2	20,018	19,078	4,696
3	23,009	21,291	7,467
4	20,012	19,2	4,058
5	20,022	19,2	4,105
6	20,009	19,5	2,544
7	20,004	19,4	3,019
8	20,008	19,6	2,039
9	30,019	29,244	2,582
10	30,028	29,644	1,279
11	30,005	29,764	0,803
12	30,021	29,801	0,733
13	30,001	29,952	0,163
14	30,067	29,823	0,812
15	30,001	29,636	1,217
16	30,008	29,699	1,030
17	30,018	29,724	0,979
18	30,024	29,789	0,783
19	30	29,712	0,960
20	30,007	29,712	0,983
21	30,004	29,915	0,297
22	30,05	29,714	1,118
23	30,032	29,737	0,982
24	30,027	29,772	0,849
25	30,029	29,793	0,786
26	30,045	29,795	0,832
27	30,056	29,665	1,301
28	30,01	29,636	1,246
29	30,01	29,686	1,080
30	30,037	29,629	1,358
31	30,008	29,698	1,033
32	30,016	29,63	1,286
33	30,042	29,636	1,351
34	30,042	29,431	2,034
35	30,028	29,556	1,572
36	30,009	29,436	1,909
37	30,029	29,804	0,749

Tabla 22. (Continuación)

Muestra	Retazos de cuero (g)	Cuero molido (g)	Pérdidas por molienda (%)
38	30,033	29,672	1,202
39	30,012	29,701	1,036
40	30,023	29,688	1,116
41	30,027	29,738	0,962
42	30,018	29,615	1,343
43	30,02	29,544	1,586
44	30,009	29,687	1,073
45	30,018	29,634	1,279
46	30,016	29,76	0,853
47	30,013	29,776	0,790
48	30,001	29,76	0,803
49	30,004	29,79	0,713
50	30,02	29,817	0,676
51	30,001	29,948	0,177
52	30,012	29,737	0,916
53	30,022	29,732	0,966
54	30,014	29,791	0,743
55	30,025	29,724	1,002
56	30,01	29,663	1,156
57	30,014	29,723	0,970
58	30,016	29,808	0,693
59	30,01	29,646	1,213
60	30,011	29,677	1,113
61	30,02	29,555	1,549
62	30,003	29,648	1,183
63	30,015	29,693	1,073
64	30	29,619	1,270
65	30	29,711	0,963
66	30,004	29,636	1,227
67	30,013	29,782	0,770
68	30,004	29,725	0,930
69	30,012	29,704	1,026
70	30,016	29,75	0,886
71	30,005	29,61	1,316
72	30,038	29,73	1,025
73	30,003	29,69	1,043
TOTAL	2124,239	2095,206	1,367

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los datos recolectados en la tabla 22, se puede decir que no hay pérdidas significativas durante la molienda siendo 0,163% el valor más bajo correspondiente a la muestra 13. Sin embargo, el valor máximo se registra en la muestra número 1 con una pérdida del 8,606% que puede estar representada en el material que queda atascado en el molino, al que se adhiere al recipiente de vidrio debido al giro de la cuchilla o al que se pierde en los cambios de recipiente de la muestra.

Una vez molido el cuero, se almacena en las bolsas nuevamente mientras se procede con la elaboración del material aglomerado.

3.3 CONFORMACIÓN DEL AGLOMERADO DE CUERO Y LIGNINA

Después de los procesos que se llevaron a cabo para obtener la lignina y el cuero necesarios para la conformación del aglomerado, se procedió a desarrollar la polimerización obteniendo como resultado 20 probetas de ensayo del material aglomerado de acuerdo a la norma ASTM D882 correspondiente a películas delgadas.

3.3.1 Polimerización. La etapa final del proceso comprende una fase de mezcla de ingredientes que permiten la conformación del material aglomerado como tal; y una fase posterior que permite sellar el material bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. A continuación, se describe el procedimiento de polimerización que se llevó a cabo en cada probeta.

3.3.1.1 Materiales. Además del cuero y la lignina obtenidos en las dos primeras fases del proyecto, se sugieren una serie de aditivos que permiten un mejor desempeño de la placa. Los materiales y su función dentro de la polimerización son:

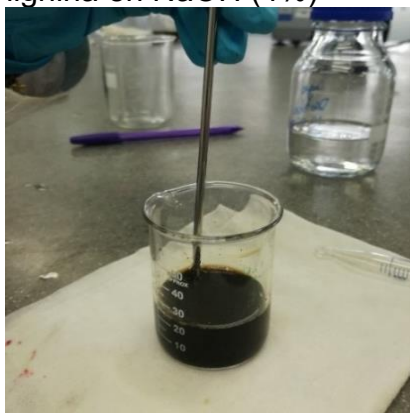
- **PVA:** El alcohol poli vinílico actúa básicamente como un aditivo importante en el grado de plasticidad que tenga el material. Por lo tanto, es un ingrediente que se deberá variar con la lignina, para que de esta manera cada probeta adquiera propiedades diferentes.
- **Glicerina:** Es un líquido altamente viscoso que se encarga de darle una mayor plasticidad al material aglomerado. En el estudio realizado, se usan 20ml proporcionándole al material una capacidad higroscópica alta, pero como lo que se quiere para este proyecto es un material que sirva para elaborar empaques, la higroscopicidad es un factor que hay que reducir. Por esto, de acuerdo al análisis presentado en la tesis, si se tiene una menor cantidad de glicerina, el material tiende a ser menos reactivo con respecto al agua, lo cual permite definir que se usaran 2ml de glicerina en cada muestra. Lo correcto sería anular por

completo el uso de lignina, pero como también proporciona cierto grado de plasticidad al material, entonces se decide colocarla en pequeñas cantidades.

- **NaOH (4%):** La lignina obtenida de la hidrólisis se encuentra en estado sólido, y como se disuelve en medio básico, se plantea el uso de NaOH a una baja concentración para solubilizarla, siguiendo lo afirmado por Chávez y Domine⁸⁶. Por lo tanto, se plantea una base de cálculo de 20ml de solución para la elaboración del material.
- **Ácido Bórico:** Es un ingrediente que le resta a la capacidad de absorción de agua que podría tener el material. Según el estudio realizado entre mayor sea la adición de ácido bórico a la mezcla, menor será su capacidad higroscópica, por lo tanto teniendo en cuenta que las proporciones son menores en este experimento, se plantea que se deberá adicionar 1g de este compuesto para proporcionarle a la muestra un ingrediente espesante y para disminuir la cantidad de agua que pueda absorber del ambiente una vez hecho el material.

3.3.1.2 Procesos de polimerizado. El proceso planteado en la tesis de referencia fue ligeramente modificado debido a que había algunos componentes que aumentaban las características de higroscopicidad y para este caso es lo que menos se necesita. La carboximetilcelulosa (CMC) fue reemplazada por la lignina, mientras se suprime el uso de NaCl y de etanol debido a que el primero es el principal causante de la higroscopicidad del material obtenido y el segundo se usa para solubilizar el PVA que en este caso ya se encuentra en solución. Inicialmente la lignina fue disuelta en los 20ml de NaOH (4%) tornando la mezcla a un color café oscuro, como se muestra en la figura 49.

Figura 49. Disolución de lignina en NaOH (4%)



Fuente: elaboración propia

⁸⁶ CHÁVEZ S., Marvin y DOMINE, Marcelo. Op. cit., p. 29.

Posteriormente se adicionó el PVA de acuerdo al diseño de experimentos planteado, se agitó y se adicionó el ácido bórico. Una vez realizada esta mezcla, se puso en agitación en la plancha de calentamiento a 60°C como lo indica el protocolo por un tiempo de 5 minutos; y finalmente se adicionan lo 2ml de glicerina a la mezcla continuando con la agitación, pero esta vez a 70°C por 4 minutos, como se ve en la figura 50.

Figura 50. Mezcla aglomerante



Fuente: elaboración propia

Mientras la mezcla estaba en agitación, se pesaron 5g de polvo de cuero para cada muestra, los cuales fueron posteriormente mezclados con el aglomerante. Se homogeniza con la espátula hasta lograr una masa húmeda, como se muestra en la figura 51.

Figura 51. Mezcla del aglomerado lista para moldeo



Fuente: elaboración propia

La mezcla se deja reposar 2 minutos para luego proceder con el vertimiento de la misma en el molde. Para que el material seco se pueda desmoldar fácilmente, se coloca vinipel como base en el molde, y luego se procede con moldeo que debe hacerse de manera cuidadosa para que la mezcla quede bien distribuida y se logre una capa delgada como se espera, mediante el uso de una espátula pequeña, ver figura 52.

Figura 52. Moldeo de la mezcla aglomerada (Muestra 1)



Fuente: elaboración propia

Una vez dispuesta la muestra a lo largo del molde, se sometió a un proceso de secado previo al prensado, el cual se describe a continuación.

3.3.2 Pre-secado del material aglomerado. Esta primera fase de secado del material se llevó a cabo en el horno referenciado en la sección 2.1.2.3, el cual mediante un flujo de aire caliente retira el agua presente en cada muestra. Este primer secado se realiza a 100°C por un tiempo de 30 min, con el fin de que el material no quede seco completamente para que cuando se preense, se genere la placa delgada que se quiere, de un espesor pequeño como lo dice la norma.

3.3.3 Prensado del material. Después de que se reduce el contenido de agua del material, la muestra es llevada a una prensa a 80°C por un periodo de 40 segundos. Este procedimiento se realiza por cada cara del material, es decir, que se prensa y posteriormente se voltea la placa y se prensa de nuevo, con el fin de mejorar el estado final del material. El resultado del prensado se puede ver en la figura 53.

Figura 53. Placa prensada (Muestra 1)



Fuente: elaboración propia

3.3.4 Secado del material. La última fase de secado se realiza para sellar el material de manera definitiva. Aún después del presado, el material continúa con un cierto porcentaje de agua, el cual se deberá remover en esta etapa. Por lo tanto, se reduce la temperatura de secado en el mismo horno a 60°C y se deja el material secando de un día para el otro, es decir, por un periodo aproximado de 15 horas. Cuando el material se retira del horno, se encuentra más rígido y totalmente seco, ver figura 54.

Figura 54. Placa seca, lista para pruebas (Muestra 1). a) Frente b) Revés



a)



b)

Fuente: elaboración propia

3.3.5 Aplicación de pruebas físico-mecánicas. La prueba realizada a cada una de las probetas de material aglomerado consistió en aplicar una fuerza de tensión al material hasta lograr deformación y/o ruptura del mismo. Las pruebas de tensión permiten evaluar qué tan resistente, rígido o dúctil puede ser un material⁸⁷.

⁸⁷ ASKELAND R., Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. Tercera edición. USA. International Thomson Editores. 1998. p. 131.

Para llevar a cabo las pruebas, se siguió el protocolo impuesto por la norma ASTM D882, lo permitiendo el correcto desarrollo de las mismas para obtener resultados satisfactorios que permitieron evaluar todas las probetas y comparar su comportamiento, para que con ayuda del diseño de experimentos se pudiera conocer la composición del material que más se asemeje a lo que se busca en este proyecto.

Inicialmente las dimensiones de cada probeta de prueba fueron ajustadas de acuerdo al ancho de las prensas del equipo que la sujetan, es decir, que de ancho cada muestra debía tener 2,5cm y un largo aproximado de 10cm, este último podía tener variaciones, puesto que es ajustable este parámetro en el equipo de la prueba.

Un proceso previo a las pruebas, es medir la uniformidad de la placa, por lo tanto, se realizó una medición del espesor en 3 puntos diferentes, haciendo uso de un tornillo micrométrico MITUTOYO, como se muestra en la figura 55, el cual arroja datos en mm, pero teniendo en cuenta que el software del equipo maneja unidades del sistema inglés, se procedió a hacer el cálculo del promedio y la conversión a pulgadas, datos que se encuentran en la tabla 23.

Figura 55. Medición de espesor de probeta M1



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 23, las muestras correspondientes a M3 y M13 no registran valores de espesor, debido a que las muestras no quedaron muy compactas ni uniformes, sino que tuvieron una tendencia a aglomeraciones. Por lo tanto, al manipular cada muestra, esta se desmoronó totalmente, como se muestra en la figura 56, impidiendo la aplicación del test.

Tabla 23. Espesor de cada muestra de material

Muestra	d1	d2	d3	Promedio (mm)	Promedio (in)
M1	1,74	1,78	2,1	1,87	0,075
M2	1,21	1,05	1,15	1,14	0,045
M4	1,97	1,56	1,88	1,80	0,072
M5	1,59	1,59	1,7	1,63	0,065
M6	1,68	1,73	1,7	1,70	0,068
M7	1,54	1,8	1,82	1,72	0,069
M8	1,95	1,95	1,81	1,90	0,076
M10	1,43	1,32	1,4	1,38	0,055
M11 (M1.)	2	1,96	1,84	1,93	0,077
M12 (M2.)	1,2	1,2	1,15	1,18	0,047
M14 (M4.)	2,19	1,95	1,75	1,96	0,079
M15 (M5.)	1,52	1,49	1,44	1,48	0,059
M16 (M6.)	1,51	1,78	1,61	1,63	0,065
M17 (M7.)	1,91	2,16	1,84	1,97	0,079
M18 (M8.)	1,95	1,85	1,8	1,87	0,075
M20 (M10.)	1,42	1,53	1,46	1,47	0,059

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. M3 y M13 después de intentar cortar las probetas para pruebas

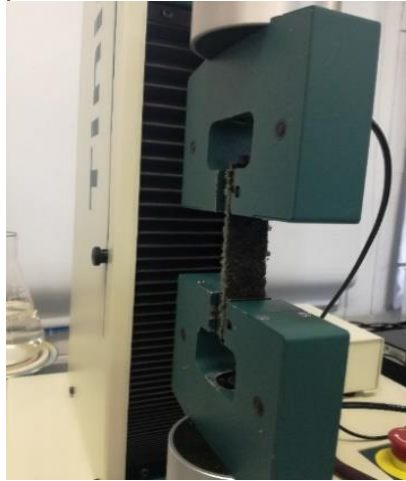


Fuente: elaboración propia

La cantidad de lignina obtenida previamente no fue suficiente para elaborar todas las probetas del diseño de experimentos, por lo tanto, se seleccionaron las muestras 9 y 19 puesto que es un punto que se repite en varias ocasiones dentro del diseño. Las posibilidades de error experimental aumentan al faltar 4 de los puntos del diseño, pero esto se analizará en el siguiente ítem una vez ejecutado el diseño experimental.

Una vez registrados los datos de espesor en el software, se procede a colocar la probeta en medio de las prensas ubicadas en cada extremo, como se aprecia en la figura 57. Las prensas sujetan la placa aplicando una presión máxima de 100Pa, con el fin de que al ejercer la tensión la placa no se suelte de alguno de los dos lados.

Figura 57. M1 lista para prueba de esfuerzo-tensión



Fuente: elaboración propia

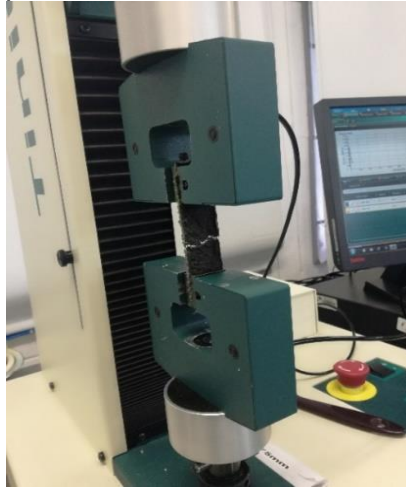
Al accionar el equipo, las prensas ubicadas a los extremos de la probeta, comienzan a realizar una fuerza opuesta entre sí tal que el material sufra una deformación hasta romperse sobre los 2/3 superiores como lo indica la norma⁸⁸, ver figura 58 en donde se aprecia la ruptura de la probeta correspondiente a M1.

A medida que el equipo realiza la fuerza, el software va dibujando la gráfica correspondiente a esfuerzo vs deformación que permite determinar la fuerza máxima necesaria para lograr la ruptura del material, además dibuja y calcula la pendiente que determina el valor del parámetro a evaluar en el diseño de experimentos, es decir, el módulo de Young.

Las gráficas de todas las muestras se encuentran en el anexo C, mientras que el análisis se encuentra después de saber cuál de las probetas evaluadas se acerca más al resultado obtenido del diseño de experimentos, es decir, en la sección 3.3.6.

⁸⁸ Norma ASTM D882-12. Propiedades de tensión para láminas plásticas delgadas.

Figura 58. M1 después de la prueba de esfuerzo-tensión



Fuente: elaboración propia

El procedimiento se realizó de la misma forma para cada probeta y para un material aglomerado similar usado como blanco, arrojando como resultado cualitativo una ruptura total de todas las placas, como se observa en la figura 59. Algunas de las probetas se fracturaron antes de lo esperado y en forma de ángulo recto, lo que indica que la ruptura se facilitó por otros factores externos a la fuerza aplicada, es decir, que el material pudo estar fracturado desde antes o que tenía ciertas imperfecciones como agujeros que impidieron el correcto rompimiento.

Una vez finalizadas las pruebas de tensión, se procede a hacer el registro de los datos en el software STATGRAPHICS para el desarrollo del diseño de experimentos que determine la relación de lignina y PVA más adecuada para su uso como material para empaques.

Figura 59. Probetas de aglomerado después de la prueba de esfuerzo-tensión



Fuente: elaboración propia

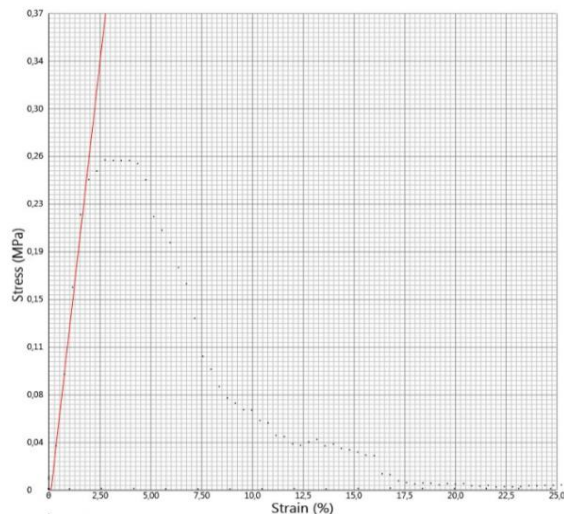
3.3.6 Desarrollo del diseño experimental para los procesos de aglomerado.

Los parámetros evaluados en este diseño de experimentos son seleccionados para determinar la composición adecuada del aglomerado que le brinde propiedades de plasticidad y resistencia al mismo tiempo, las cuales fueron determinadas en la tabla 6 de la sección 2.3.3 por el software STATGRAPHICS. La lignina empleada se obtuvo en el proceso previo con hojas de maíz, por lo tanto, los 13,708g obtenidos son los que se distribuyeron en todas las probetas, siguiendo el proceso descrito en la sección 3.1.1.

Para la toma de datos del experimento, se sigue el procedimiento impuesto por la norma ASTM D882 descrito en el apartado 3.3.5, el cual cada muestra de material se somete a tensión hasta su ruptura, arrojando la gráfica de esfuerzo vs deformación con el cálculo del módulo de elasticidad a partir de pendiente de cada una como se muestra en la figura 60, representada por la línea roja con un valor de 0,00203Mpsi para la muestra 1.

Una vez terminadas las pruebas con cada probeta, se procede a recopilar los datos de gráficas, fuerzas de ruptura y módulos de elasticidad que se obtuvieron durante el experimento, en las cuales se reconoce el comportamiento elástico del material.

Figura 60. Valor de fuerza más alto para M1



Fuente: Software prueba tensión

Los valores del módulo de Young son los elementos de interés, por lo tanto, se hace su registro en la tabla 16, manteniendo las unidades del software (Mpsi) y luego convirtiéndolas al sistema internacional para ingresarlas a STATGRAPHICS y evaluar el diseño. El factor de conversión empleado se encuentra en la ecuación 10, realizando la de la primera muestra como ejemplo y registrando los valores en la tabla 24.

$$\left(\frac{1 \times 10^6 \text{psi}}{1 \text{Mpsi}}\right) \left(\frac{0,00689476 \text{MPa}}{1 \text{psi}}\right) \quad (10)$$

$$0,00203 \text{Mpsi} \left(\frac{1 \times 10^6 \text{psi}}{1 \text{Mpsi}}\right) \left(\frac{0,00689476 \text{MPa}}{1 \text{psi}}\right) = 13,996 \text{MPa}$$

Como se puede ver, en la tabla 24 no se tienen contempladas las muestras 3, 9, 13 y 19 por las causas anteriormente descritas.

Tabla 24. Registro de datos del módulo de Young para diseño de experimentos

MUESTRA	BLOQUE	% Lignina	% Cuero	Módulo de Young (Mpsi)	Módulo de Young (MPa)
M1	1	1,5	5,11713	0,00203	13,996
M2	1	1,5	1,88287	0,0107	73,774
M4	1	2	5	0,00294	20,271
M5	1	1	5	0,0103	71,016

Tabla 24. (Continuación)

MUESTRA	BLOQUE	% Lignina	% Cuero	Módulo de Young (Mpsi)	Módulo de Young (MPa)
M6	1	2	2	0,583	4019,645
M7	1	1	2	0,00463	33,302
M8	1	2,03904	3,5	0,00651	44,885
M10	1	0,960955	3,5	0,00383	26,407
M11 (M1.)	2	1,5	5,11713	0,00532	36,680
M12 (M2.)	2	1,5	1,88287	0,00712	49,091
M14 (M4.)	2	2	5	0,00219	15,100
M15 (M5.)	2	1	5	0,00877	60,467
M16 (M6.)	2	2	2	0,00273	18,823
M17 (M7.)	2	1	2	0,00419	28,889
M18 (M8.)	2	2,03904	3,5	0,00401	27,648
M20 (M10.)	2	0,960955	3,5	0,006	41,369

Fuente: elaboración propia

Una vez terminadas todas las mediciones correspondientes al proceso del aglomerado, se procede a ejecutar el diseño de experimentos para obtener la superficie de respuesta en la cual se encuentra el punto en el que se maximiza la magnitud del módulo de elasticidad del material, buscando siempre que el cumpla con la norma y el propósito de usarlo como materia para empaques.

El software nuevamente realizó el análisis de los datos mediante un ANOVA simple, en el cual se plantearon las siguientes hipótesis:

- No hay interacción significativa entre las cantidades de lignina y PVA en la elaboración del material aglomerado.
- Si hay interacción significativa entre las cantidades de lignina y PVA en la elaboración del material aglomerado.

Al igual que en el secado y molienda, la interacción de la cantidad de lignina y PVA tienen una incidencia significativa en el proceso de elaboración del material compuesto, debido a que los procesos de polimerización están configurados para reducir tiempos de operación sin modificar la composición del mismo.

En esta ocasión el software STATGRAPHICS generó los resultados y el análisis del modelo de la misma forma que para el secado y molienda. Los datos arrojados por el software, corresponden a R-cuadrada, R- cuadrada (ajustada por g.l), Error estándar, Error absoluto medio, Estadístico Durbin-Watson, P y a la auto correlación residual; los cuales se encuentran consignados en la tabla 25.

Tabla 25. Análisis de varianza para módulo de Young

Variable	Valor
R-cuadrada	41,2373
R- cuadrada (ajustada por g.l)	14,1161
Error estándar	827,106
Error absoluto medio	425,453
Estadístico Durbin-Watson	2,3258
P	0,7097
Autocorrelación residual	0,171085

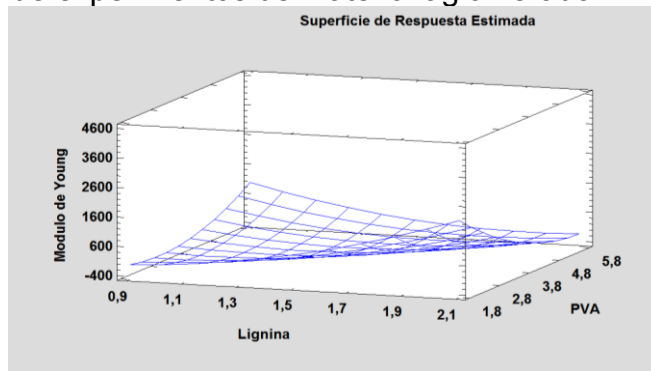
Fuente: elaboración propia

Las variables de análisis son las mismas, de modo que su significado dentro del diseño experimental, se encuentra referenciado en la sección 3.1.1.1.

Un valor de $P=0,7097$ hace referencia a la no significancia de los efectos en el experimento, debido a que es un valor que se encuentra por encima de 0,05 lo cual indica que la variación de la cantidad de lignina y de PVA no arroja cambios significativos en la resistencia del material, confirmando la hipótesis nula.

El análisis de este experimento con respecto a la incidencia de las variables es menos confiable debido a que el error es muy alto, por falta de las muestras 3, 9, 13 y 19, lo cual es una razón para que las variables elegidas no generen una correlación directa con el experimento, sin embargo, se puede deducir que es solo una de las dos variables la que ejerce una mayor influencia en la composición del material, como puede verse en la figura 61, donde los dos puntos altos que sobresalen del experimento, corresponden a la cantidad de lignina que debe haber en el material con respecto a la de PVA para maximizar ese valor del módulo de elasticidad, sesgando de esta manera la información en un solo parámetro.

Figura 61. Superficie de respuesta del diseño de experimentos de material aglomerado



Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

La figura 61 muestra los puntos máximos y los mínimos que se obtuvieron al ejecutar el diseño de experimentos para la elaboración del aglomerado. Al igual que para los diseños anteriores, se esperaba que la respuesta estuviera sesgada a un solo punto para poder determinar el comportamiento al modificar las variables independientes.

Los máximos representan que el aumento del módulo de elasticidad puede lograrse por dos caminos, es decir, si se aumenta la cantidad de lignina y se disminuya la de PVA; o si se aumenta la cantidad de PVA y se disminuya la de lignina. Por lo tanto, se confirma que la hipótesis nula se cumple para este diseño, haciendo referencia a que no existe relación de las variables independientes sobre la variable de respuesta si son modificadas en el mismo sentido, es decir, que si se aumentan o se disminuyen las cantidades de lignina y de PVA simultáneamente, no habrán cambios sobre las propiedades del material reflejadas en el módulo de Young.

Los datos consignados en la tabla 26, son el resultado de la ejecución del diseño experimental, los cuales arrojan las cantidades adecuadas de lignina y PVA que garanticen un valor de resistencia alto para el material. Para la elaboración de una placa de material de 10cm x 10cm, serán necesarios 2,03904g de lignina y 1,88287g de PVA, para alcanzar un módulo de elasticidad máximo de 1798,2 MPa, logrando de esta manera cumplir con las características propias de un empaque de calzado.

Tabla 26. Respuesta del diseño de experimentos de aglomerado

FACTOR	BAJO	ALTO	ÓPTIMO
Lignina (g)	0,960955	2,03904	2,03904
PVA (g)	1,88287	5,11713	1,88287

Fuente: Software STATGRAPHICS Centurion XVII - X64

Para el diseño experimental del aglomerado, se realizó un análisis factorial con ANOVA modificado para verificar la respuesta obtenida de la superficie de respuesta, el cual busca evaluar la interacción que tienen las variables sobre el proceso mediante un análisis de varianza de varios factores para la modificación del módulo de elasticidad.

Este método de análisis, realiza varias pruebas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el aumento del módulo de Young de cada probeta y además evalúa la significancia de las interacciones entre los factores del experimento. Para el caso particular de la elaboración del material aglomerado, se determina que el máximo valor del módulo de elasticidad se da a condiciones de igual cantidad de lignina y de PVA, caso diferente a los diseños anteriores en los que se maximiza una de las dos variables independientes para ver una modificación significativa en la variable de respuesta.

A continuación se presenta un análisis en donde se compara el material obtenido con una muestra tejida de celulosa, para evaluar la calidad del aglomerado:

Tabla 27. Comparación del material obtenido con material de referencia

Material	Módulo de Young	Características
Muestra no tejida de celulosa	210,98	Es un material empleado en la elaboración de contrafuertes para calzado, ya que proporciona dureza a las punteras y al talón. Durante la prueba se evidenció que la fuerza necesaria para romperlo fue mayor a la del aglomerado, puesto que es un material que se encuentra más compacto y con una estructura más uniforme. El módulo de Young obtenido es mucho más bajo, lo que indica que es un material dúctil ⁸⁹ .
Material Aglomerado	1798,2	El material aglomerado obtenido, presento menor resistencia a la fuerza de tensión impuesta por el equipo, debido a que factores como los agujeros a lo largo de la placa facilitaban el rompimiento con la mínima fuerza. El valor de módulo de Young diferencia el comportamiento de los dos materiales, debido que para este caso es mucho mayor indicando su fragilidad. El rompimiento del material durante la prueba fue gradual, de manera que se logró una característica elástica como se esperaba.

Fuente: elaboración propia

El material obtenido tiene como objetivo la conformación de un empaque para calzado que reemplace las cajas de cartón actualmente utilizadas en el mercado, por lo tanto, en la tabla 27 se presenta una comparación entre el aglomerado y un material no tejido de celulosa, seleccionado por tener las características de ductilidad y resistencia que se requieren para un empaque de calzado; además, es un material utilizado en el área de calzado para la creación de contrafuertes que aumentan la resistencia del mismo.

Para concluir con este experimento, se determinó que el material aglomerado es frágil pero tiene un grado de plasticidad que le impide romperse con facilidad en el momento de usarlo como empaque. Sin embargo, podría otorgársele un grado mayor de dureza para que sea un poco más resistente al impacto.

⁸⁹ ASKELAND. Donald R. Op. cit., p. 133.

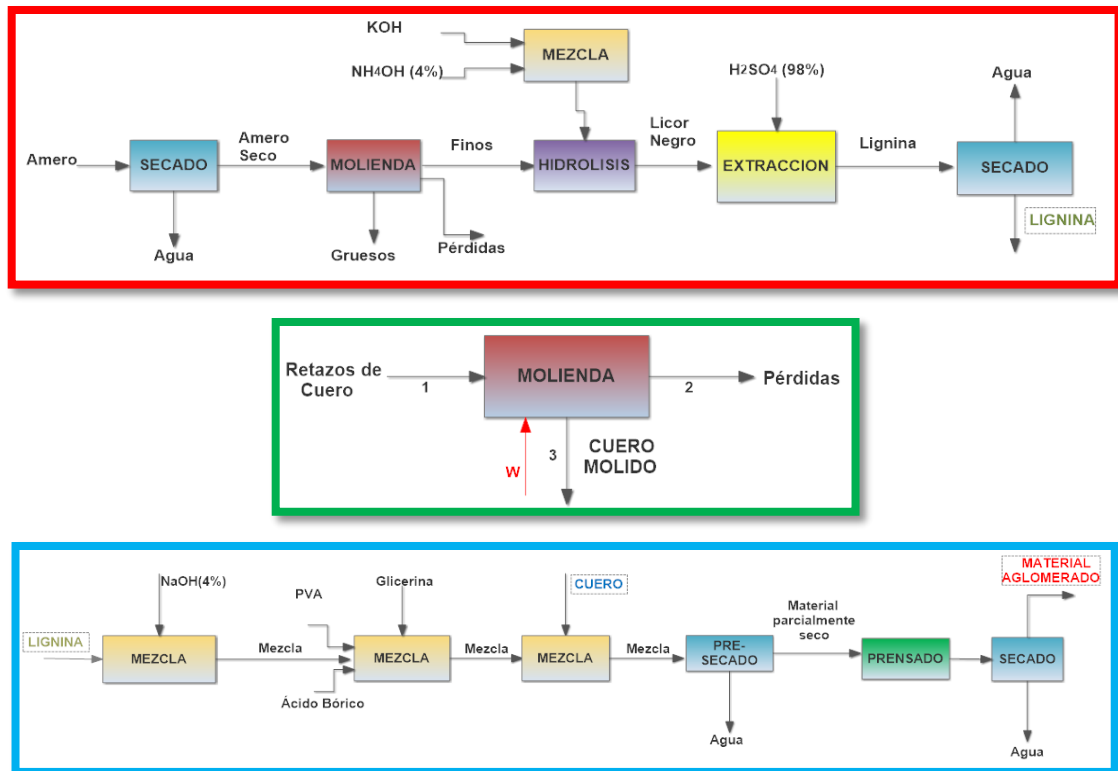
4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL PROCESO A ESCALA PILOTO

El proceso de obtención del material aglomerado trae consigo una serie de parámetros que permiten un correcto desarrollo de cada etapa, arrojando resultados satisfactorios. A continuación, se describen las condiciones de operación y las variables que se deben tener en cuenta al momento de llevar el proceso a otra escala, así como también los balances de materia y energía en cada fase.

4.1 ALTERNATIVA PARA EL DESARROLLO DE UN MATERIAL AGLOMERADO

En la figura 62, se encuentra resumida la información de los procesos que conforman el sistema de operación propuesto para el desarrollo del material. El diagrama fue elaborado en el software SMARTDRAW 2018, en el cual se precisan las unidades de procesamiento en cada etapa correspondiente a lignina, cuero y aglomerado; además se especifican las corrientes de entrada y salida de cada una y los flujos predeterminados en la experimentación.

Figura 62. Propuesta de proceso para la obtención de un material compuesto de cuero y lignina



Fuente: elaboración propia

La manera como se encuentran organizados los procesos de la figura 62, permite ver los 3 núcleos en los que se divide el proyecto. En el recuadro rojo se encuentran

las unidades que fueron tenidas en cuenta para la obtención de lignina, incluyendo los dos procesos de filtrado que en los anteriores diagramas no se habían mostrado; en el recuadro verde, se ilustra la única operación unitaria necesaria en el proceso de adecuación de cuero, sin tener en cuenta los procesos de limpieza como una unidad; y finalmente, en el rectángulo azul se describen las operaciones realizadas en la elaboración del material aglomerado, teniendo en cuenta que el mezclado se tomó como una sola unidad de proceso.

La organización de los ejes principales del desarrollo experimental se realizó con el fin de dar un mejor manejo de la información al momento de realizar los cálculos del escalamiento del proceso y de los balances de masa y energía.

4.2 BASES DE OPERACIÓN, VARIABLES Y CRITERIOS DEL PROCESO A ESCALA PILOTO

Realizar el escalado de un proceso a planta piloto permite reproducir o simular un proceso antes de llevarlo al entorno industrial, así como también el estudio del comportamiento de plantas industriales ya construidas, mediante análisis de fenómenos como termodinámica, transferencia de masa y calor, reacciones químicas, entre otras⁹⁰.

De acuerdo a la figura 62, es posible comprender el funcionamiento de los procesos de desarrollo del material aglomerado seleccionados para llevarlos a una escala mayor, estableciendo parámetros y condiciones de operación como temperatura, tiempo, concentración y velocidad para el caso secado y molienda; mientras que para el aglomerado, se tienen en cuenta las concentraciones, los tiempos de operación, y algunas condiciones de agitación.

Por otro lado, se realiza el escaldo de los equipos que son utilizados en el proceso de elaboración del material aglomerado, haciendo énfasis en las dimensiones y características del mismo.

4.2.1 Secado. El secado en este caso es una operación que se realiza en cuatro ocasiones, cada una con diferentes condiciones, las cuales fueron determinadas teniendo en cuenta la naturaleza, ya que el material puede perder sus propiedades al no soportar altas temperaturas. En la tabla 28, se describen las condiciones y variables a tener en cuenta en el desarrollo de este proceso.

Las variables de secado, fueron establecidas mediante un diseño de experimentos desarrollado en la sección 3.1.1.1 para el caso de los ameros, por lo cual se permite afirmar que son las condiciones más adecuadas para el que el material cumpla el

⁹⁰ ANAYA D., Alejandro y PEDROZA F., Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. Tecnol. Ciencia Ed. Vol. 23. No. 1. 2008. p. 32.

objetivo sin tener repercusiones negativas en su composición y no es conveniente cambiarlas bajo ninguna circunstancia.

Los valores de las demás operaciones de secado, están comprobadas y respaldadas por estudios previos que determinaron que son las más adecuadas para lograr el secado, por lo tanto, no es conveniente modificarlas a menos que se compruebe con más estudios la veracidad y efectividad de las nuevas condiciones.

Tabla 28. Especificaciones de operaciones de secado

ELEMENTO	T (°C)	TIEMPO (h)	EQUIPO
Ameros	84,14	1,35	La lignina y el material fueron secados por convección forzada, es decir, que el horno empleado trabaja con una corriente de aire caliente que remueve el agua de la superficie; caso contrario al de los ameros, ya que el secado se realiza por convección natural, es decir, que el ambiente controlado a alta temperatura permite remover el agua no ligada del material. Recomendación: El secado es conveniente hacerlo con un solo horno para no incurrir en altos costos de implementación, solo que sí se debe tener en cuenta que cualquier variación en cuanto al fenómeno de transferencia de calor que se emplee, los balances de materia y energía se verían afectados directamente por las condiciones del ambiente en el que se opera.
Lignina	60	24	
Material (Pre-Secado)	100	0,5	
Material	60	12	

Fuente: elaboración propia

4.2.2 Molienda. La molienda es una operación que se realiza en dos ocasiones y para materiales diferentes, obteniendo un resultado similar bajo condiciones de velocidad y tiempo diferentes, las cuales se describen en la tabla 29.

A pesar de que las variables fueron seleccionadas con fundamentos teóricos y/o experimentales, el desarrollo del proceso no fue el esperado. El tamaño del equipo influyó negativamente en la eficiencia del proceso como tal, por tal motivo, la idea de sustituirlo por un molino industrial es la más apropiada para mejorar tiempos de operación y calidad de producto final.

Al implementar un equipo más especializado, se debe tener en cuenta que las variables y condiciones de operación cambian, por lo tanto, se hace necesario ajustarlas e implementarlas en el proceso.

Tabla 29. Especificaciones de operaciones de molienda

ELEMENTO	VELOCIDAD (rpm)	TIEMPO (s)	EQUIPO
Ameros	2107,67	34,14	<p>La reducción de tamaño de ambos elementos se realizó en una picadora convencional de 4 velocidades cuyos valores se obtuvieron de las especificaciones técnicas del equipo. Posterior a la operación, se realizó un tamizado para separar los finos de los gruesos. Los datos se obtuvieron a partir de un diseño de experimentos para el caso de las hojas de maíz, mientras que para el cuero al ser un material tan grueso fue necesario fijar una velocidad por un tiempo aproximado de 20 segundos, hasta observar que el cuero se transforma en polvo.</p> <p>Recomendaciones: El molino es un factor para que el proceso sea largo y complejo, por tal razón se propone realizar esta operación con un molino industrial de un tamaño moderado con tamices de diferentes tamaños incluidos.</p>
Cuero	2700	20	

Fuente: elaboración propia

4.2.3 Hidrólisis y extracción de lignina. La hidrólisis se divide en dos fases importantes, pulpeo y extracción, en las cuales sucede la solubilización y precipitación de la lignina respectivamente. A continuación, en la tabla 30 se describen las condiciones de cada subproceso y los equipos empleados.

Las condiciones del proceso de hidrólisis fueron establecidas por una investigación previa en la que se obtuvieron resultados satisfactorios, los cuales están descritos en la sección 3.1.2.1. Las condiciones iniciales fueron modificadas para este proyecto con respecto al volumen y a la concentración de NH_4OH con el fin de mejorar la eficiencia del proceso obteniendo los mismos resultados. El volumen de este reactivo puede variar de acuerdo a la materia prima que se emplee, y el estado de humedad de la misma; para este caso, al amero se le retiro la totalidad de agua no ligada para facilitar la molienda, por lo tanto al colocarlo en la solución del hidróxido de amonio absorbió el líquido formando una pasta solida sin fluidez. Entonces es imperativo evaluar la proporción de la mezcla en caso de emplear el proceso con otro material lignocelulósico.

La concentración de NH_4OH se disminuyó a la mitad con respecto a la investigación realizada previamente, con el objetivo de reducir cantidades y de esta manera reducir costos de proceso manteniendo los volúmenes de producción de lignina iguales.

Tabla 30. Especificaciones de operaciones de extracción de lignina

ELEMENTO	CONDICIONES	EQUIPO
Pulpeo	<ul style="list-style-type: none"> • Amero:25g • KOH:1,25g • NH₄OH(2%): 400ml • Tiempo de cocción: 1h • T°:155°C 	<p>Para esta fase, se hace necesario que la mezcla este bajo condiciones de alta temperatura y agitación constante, por tal razón, se debe usar una plancha de calentamiento con agitación magnética que ayude a la separación de la lignina.</p>
Filtrado	P _{Bomba} : -0,5bar	<p>El primer proceso de filtrado se realiza con una bomba de vacío que agiliza el paso del líquido a través de los poros del filtro. Se realiza con un filtro de matraz de kitasato el cual se conecta a la bomba facilitando el filtrado.</p>
Extracción	H ₂ SO ₄ (98%): 2ml	<p>El montaje para la precipitación de la lignina no requiere de algún equipo, únicamente de una bureta u su respectivo soporte que permita agregar el ácido de manera gradual hasta obtener la lignina en el fondo del recipiente.</p>
Filtrado	Filtrado por gravedad	<p>La segunda fase de filtrado no requiere de ningún equipo. Basta con el filtro de matraz de kitasato para que el líquido pase a través de los poros.</p>

Fuente: elaboración propia

4.2.4 Mezclado. Esta operación se realiza en la fase final del proyecto, es decir, en la elaboración del aglomerado. Se da en tres etapas a diferentes condiciones de operación, las cuales se mencionan en la tabla 31.

Las variables del proceso de aglomerado, fueron establecidas mediante un diseño de experimentos desarrollado en la sección 3.3.6 en el que se determina la composición más adecuada para el desarrollo del material para uso en empaques. Por lo tanto, se deberá hacer un escalado en caso de querer diseñar una placa de material de mayor tamaño, mas no se deberán modificar las condiciones ya establecidas para que evitar tener repercusiones negativas en su composición, a menos de que se pueda soportar experimentalmente o con estudios previos.

Tabla 31. Especificaciones de operación de mezclado para material

ELEMENTO	CONDICIONES	EQUIPO
Lignina+NaOH(4%)	<ul style="list-style-type: none"> • Lignina: 2,03g • NaOH (4%): 20ml Agitación manual	La disolución de la lignina se realiza mediante agitación manual, en el cual se mezclan los dos ingredientes hasta notar un tono café oscuro sin sólidos suspendidos.
Mezcla aglomerante	<ul style="list-style-type: none"> • PVA: 1,88g • Ácido Bórico: 1g T°:60°C t: 5 minutos • Glicerina: 2ml T°:70°C t: 4 minutos Agitación manual	La mezcla aglomerante se realiza en la plancha de calentamiento, en dos fases, antes y después de la glicerina como se indica, con el fin de facilitar la homogenización de los ingredientes.
Mezcla+Cuero	Cuero: 5g Agitación manual	La mezcla es puesta con el polvo de cuero, agitando de manera manual hasta obtener una masa que no se pegue a las paredes del recipiente. El molde que se usa deberá soportar altas temperaturas y cumplir con las medidas que se requieren para la placa. Un posible inconveniente en este proceso es la falta de una tapa para el molde que homogenice la textura y disminuya el espesor. Recomendación: Molde con tapa.

Fuente: elaboración propia

4.2.5 Prensado. El procedimiento que se lleva cabo en esta fase es sencillo y permite darle ciertas propiedades a la placa de material. El procedimiento consiste en aplicar presión para homogenizar la textura y espesor de la placa plana, una vez se ha realizado la fase de pre-secado. En la tabla 32 se describen las condiciones para llevar a cabo el prensado del material. Las condiciones establecidas para el prensado, puede estar sujetas a cambios, teniendo en cuenta que para fijarlas no se contó con alguna aplicación anterior. El proceso puede funcionar bajo condiciones similares que deberán estudiarse según las especificaciones que se tengan para el material.

Tabla 32. Especificaciones de operación de prensado de material

ELEMENTO	T (°C)	TIEMPO (s)	EQUIPO
Placa de material aglomerado	80	40	El prensado se realiza una vez la muestra pasa por un primer periodo de secado, de tal manera que al aplicar la presión esta pueda aun cambiar su forma. El procedimiento se realizó en una prensa de estampación, aplicando una temperatura media por un tiempo corto. El equipo no es idóneo para este procedimiento, por lo tanto, se sugiere realizar el prensado con un equipo especializado para moldeo de placas planas.

Fuente: elaboración propia

4.3 BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA

En esta sección se evaluará el comportamiento de cada una de las variables que interfieren en los procesos de elaboración del material aglomerado, con el fin de conocer qué sucede con cada una de las especies que interfieren en las fases del proceso para dar cumplimiento a la ley de conservación de la masa, en la que se afirma que la masa no se crea ni se destruye, sino que por el contrario se transforma⁹¹.

4.3.1 Balances de Masa. Los balances de masa elaborados, se hicieron a partir de los datos recogidos durante la fase de experimentación. A continuación, en las tablas 33, 34 y 35 se presentan los resultados de los flujos y composiciones de cada corriente y en el anexo D se encuentra el desarrollo de los cálculos para cada unidad.

4.3.1.1 Fase de extracción de lignina. La fase de lignina trae consigo siete subprocesos, sobre los cuales se realizaron los cálculos de los balances. En la tabla 33, se registran los resultados correspondientes a flujos y composiciones del sistema planteado para la obtención de lignina.

⁹¹ DEIANA, Ana C.; GRANADOS, Dolly L. y SARDELLA, María F. Introducción a la ingeniería: Balance de masa. 2018. p. 2.

Tabla 33. Resultados de balances de masa para fase de lignina

Flujos (g)		Composiciones	
F1	200	Y1	0,7641
		X1,amero	0,2359
F2	152,816	X2,amero	0,9999
F3	47,184	Y3	1
F4	25	----	
F5	1,585	----	
F6	1,834	----	
F7	357,25	X7,KOH	0,0035
		X7,NH4OH	0,9965
		X8,Lign	0,015
		X8, Celu	0,0196
F8	382,25	X8,Hemi	0,0046
		X8,KOH	0,0033
		X8, NH4OH	0,9313
		X9,Lig	0,0558
		X9,KOH	0,0036
F9	349,74	X9,NH4OH	0,9106
		X10,Celu	0,2304
F10	31,512	X10, Hemi	0,0558

F11	3,68	----	
F12	346,06	X12, Lig	0,0564
		X12, H2SO4	0,0106
		X12, KOH	0,0036
		X12, NH4OH	0,9203
F13	7,016	X13, Lig	0,1577
		X13, Agua	0,8545
F14	339,04	----	
F15	1,1065	X15, Lig	1
F16	5,9095	X16, Agua	1

Fuente: elaboración propia

4.3.1.2 Fase de adecuación de cuero. Para la adecuación del cuero, fue necesaria una operación de molienda únicamente, en la que se trituro el cuero hasta volverse polvo. En la tabla 34 se resumen los valores de los flujos obtenidos de los balances, no hay composiciones debido a que solo participa el cuero en esta operación.

Tabla 34. Resultados de balances de masa para fase de cuero

Flujos (g)	
F1	30
F2	1,2985
F3	28,7015

Fuente: elaboración propia

4.3.1.3 Fase de elaboración de aglomerado. En la fase final, se realiza el cálculo de los balances de masa para los procesos de mezclado, pre-secado y secado del material obtenido. Para el proceso de mezclado se unificaron todas las variables de las 3 mezclas inicialmente planteadas. En la tabla 35 se presentan los resultados obtenidos para cada corriente, con flujos y composiciones.

Tabla 35. Resultados de balances de masa para fase de aglomerado

Flujos (g)		Composiciones	
F1	33.23	X1, Lig	0.0611
		X1, Agua	0.6019
		X1, NaOH	0.0241
		X1, PVA	0.0566
		X1, ac.Bo	0.0301
		X1, Gli	0.0758
		X1, Cuero	0.1505
F2	33.23	X2, Lig	0.0611
		X2, Agua	0.6019
		X2, NaOH	0.0241
		X2, PVA	0.0566
		X2, ac.Bo	0.0301
		X2, Gli	0.0758
		X2, Cuero	0.1505
F3	20.317	X3, Lig	0.0999
		X3, Agua	0.3489
		X3, NaOH	0.0394
		X3, PVA	0.0926
		X3, ac.Bo	0.0492
		X3, Gli	0.1240
		X3, Cuero	0.2462

Tabla 35. (Continuación)

Flujos (g)		Composiciones	
F4	12.913	Y, Agua	1
		X5, Lig	0.0999
		X5, Agua	0.3489
		X5, NaOH	0.0394
F5	20.317	X5, PVA	0.0926
		X5, ac.Bo	0.0492
		X5, Gli	0.1240
		X5, Cuero	0.2462
		X6, Lig	0.1534
		X6, NaOH	0.0605
F6	13.2284	X6, PVA	0.1422
		X6, ac.Bo	0.0756
		X6, Gli	0.1904
		X6, Cuero	0.3781
F7	7.0886	Y, Agua	1

Fuente: elaboración propia

4.3.2 Balances de energía. Las unidades para las que fue necesario realizar el balance de energía fueron en las cuales hubo alguna forma de energía como calor o trabajo, las cuales fueron calculadas haciendo uso de las ecuaciones 3 y 4. En la tabla 36 se muestran los resultados de los balances de energía obtenidos en cada etapa del proceso.

Para el cálculo de estos balances, se usaron valores de Cp de acuerdo a cada especie, teniendo en cuenta también los valores de los flujos y composiciones obtenidos de los balances de masa.

Como se puede observar en la tabla 36, el calor obtenido en la fase de extracción es negativo, lo cual permite afirmar que es calor que se genera a causa del contacto del ácido sulfúrico con el agua presente en la mezcla, dando lugar a una reacción exotérmica.

Tabla 36. Resultados del balance de energía

Operación	Q (kJ)	W (w)
Secado (Hojas)	26.6	----
Molienda (Hojas)	----	350
Hidrólisis	0.185	----
Filtrado	----	2237,1
Extracción	-0.1874	----
Secado (Lignina)	7.3000	----
Molienda (Cuero)	----	350
Mezcla (material)	5.0888	----
Pre-Secado	9.3747	----
Prensado	----	9400
Secado (Material)	1.9602	----

Fuente: elaboración propia

4.4 ESCALADO DEL PROCESO PARA LA ELABORACIÓN DE UN EMPAQUE DE CALZADO

Para el desarrollo del material en el laboratorio se tuvieron en cuenta cantidades pequeñas de insumos y productos para obtener las probetas de prueba, pero para elaborar una placa de mayor tamaño es necesario recalcular dichos valores para cada unidad.

Los valores iniciales se obtuvieron de los diseños experimentales realizados, lo que indica que la composición del material es la más adecuada para lograr buenas propiedades de resistencia, haciendo posible el uso del mismo en empaques para calzado.

Las probetas hechas en el experimento presentaron un fenómeno particular debido al método de moldeo y prensado realizados, el cual impide el correcto funcionamiento del material como empaque. Para el escalado, se considera aumentar el peso de la placa en 1,5 veces, pasando de 8,246g a 12,369g manteniendo el volumen inicial, con el fin de que aumente la densidad y de esta manera el espesor evitando la formación de poros, el cálculo de esta se realiza a partir de la ecuación 11.

Con los datos de la placa de 10cm x 10cm, se calcula la densidad inicial del material:

$$\begin{aligned}
 L &= 10 & V &= (10 * 10 * 0,2)cm = 20cm^3 \\
 h &= 10 \text{ cm} & \rho &= \frac{m}{v} \\
 e &= 0.2 \text{ cm} & \rho &= \frac{8,246g}{20cm^3} = 0,4123g/cm^3
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Con el dato del peso aumentado, se calcula el nuevo valor de la densidad de material para la misma placa, haciendo uso de la ecuación 11 nuevamente:

$$\rho = \frac{12,369g}{20cm^3} = 0,61845 g/cm^3$$

Con el nuevo valor de densidad ya es posible ajustar los cálculos de la nueva placa, con la ecuación 11 se calcula la masa de la placa:

$$V = (100 * 70 * 0,2)cm = 1400cm^3$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$m = \rho * V$$

$$m = 0,61845 g/cm^3 * 1400cm^3 = 865,83g$$

Habiendo determinado los valores de peso y densidad de la placa se procede a emplear factores de conversión para encontrar las cantidades de insumos y reactivos necesarios para la obtención de lignina.

$$865,83g \left(\frac{2,03904g \text{ Lignina}}{8,246g} \right) = 214,10g \text{ Lignina}$$

Los gramos de lignina son el punto de partida para determinar las demás cantidades de insumos necesarios en el proceso, los cuales se encuentran en la tabla 37. Los cálculos para determinarlos se encuentran en el anexo E.

Tabla 37. Resumen de escalamiento de proceso para placa de 1mx70cm

PROCESO	MATERIAL	CANTIDAD
Obtención de lignina	Amero Seco	4837,32g ≈ 4,8kg
	Hojas de Maíz	20504,07g ≈ 20,5kg
	NH ₄ OH (30%)	4519,99ml ≈ 4,5L
	KOH	241,87g
	H ₂ SO ₄ (98%)	386,99ml
Obtención de cuero	Cuero en polvo	525g
	Retazos de cuero	548,75g
	PVA	192,32ml
Obtención de aglomerado	Glicerina	210ml
	Solución NaOH (4%)	2100ml Sln ≈ 2,1L
	NaOH	84g
	Ácido Bórico	105g

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los balances de masa y de energía de la sección 4.3 y los resultados del escalamiento del proceso, se procede a estimar las dimensiones de los equipos empleados en cada unidad.

4.5 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PARA PROCESO A ESCALA PILOTO

El dimensionamiento de equipos se realiza con el fin de establecer criterios para el funcionamiento correcto del proceso si se lleva a una planta piloto. A continuación, se describen las relaciones de diseño obtenidas del uso de la regla del pulgar referenciada por Walas⁹² para los equipos empleados en la elaboración del material aglomerado.

4.5.1 Horno de secado. El horno es un equipo que se utiliza en tres fases del proceso, secado de hojas de maíz, secado de lignina y finalmente secado del material aglomerado. Como las hojas y la lignina pueden secarse por lotes grandes o pequeños dependiendo del tamaño del horno, las dimensiones del equipo se determinan a partir del área de la placa de material aglomerado que se quiere obtener. Por lo tanto, se plantean las siguientes especificaciones para fabricar placas de 1m de largo por 70cm de ancho.

Para empezar con el diseño, es necesario establecer una serie de condiciones que permiten unificar los criterios, por ejemplo, se establece que el mecanismo de la transferencia de calor es por convección y se da de manera unidireccional sobre el eje Z, es decir, perpendicular a la placa, debido a que la transferencia que se da sobre este eje, es mucho mayor que la que se da sobre el eje X y sobre el eje Y, por lo tanto se considera despreciable.

El horno Memmert UN260 empleado en la fase experimental, funciona como base para el diseño del equipo de secado que deberá usarse en el proceso escalado a planta piloto, ya que, algunos datos como capacidad, área de las bandejas y consumo energético permiten realizar un cálculo más aproximado de las nuevas características del equipo. El actual volumen del horno es de 256L, el cual trae dos bandejas internas de 64cm de ancho, 80cm de alto y 50cm de profundidad, empleando 1800W durante su funcionamiento. Mientras que para el área requerida (100 x 70) empleando la misma relación, se establece que la capacidad es de 1120L distribuida en las medidas que se muestran en la figura 63, con un consumo energético de 7875W; cálculos que se encuentran en el anexo F.

⁹² WALAS, S. Chemical process equipment. Rules thumb. 1990

Figura 63. Dimensiones para horno de secado



Fuente: elaboración propia

Una vez calculadas las dimensiones del equipo, se procede a determinar la tasa de transferencia de calor, para la placa nueva a realizar. Para este dimensionamiento se calculan directamente las variaciones unidimensionales del proceso ajustando a radiación originada por el aire caliente del horno como mecanismo secundario, debido a que la convección se da estando en flujo estacionario, dejando el proceso de transferencia de calor únicamente ligado a la superficie del material⁹³.

Dicho esto, se procede a establecer la relación que permite determinar el requerimiento energético de la placa en el momento del secado, el cual se calcula a partir del valor de Q determinado en el balance de energía para esta operación, arrojando 2223.26kJ como el nuevo valor Q para la placa de mayor área.

4.5.2 Molino. Se había contemplado inicialmente el reproceso del material grueso obtenido del proceso de molienda, pero según la regla del pulgar, un rectificado se realiza en un proceso de circuito cerrado, el cual a su vez es más común en procesos que empleen molinos de bolas o rodillos⁹⁴. Como en este caso se hace uso de un molino de cuchillas por los tipos de materias primas empleadas, entonces se recomienda no hacer reproceso del material de gruesos.

Para esta operación se utiliza un molino de cuchillas que funcione para reducir el tamaño de partícula de las hojas de maíz, pero que también triture el cuero, para no incurrir en mayores costos. El molino es un PULVERISETTE 15 (ver figura 64), de acero inoxidable, seleccionado porque dentro de su sistema cuenta con mallas que separan las muestras evitando la operación de tamizado dentro del proceso, además tiene la facultad de moler tanto hojas de maíz como retazos de cuero. El diámetro de partícula está entre 0.2 y 6mm y el consumo de energía esta por los 4400W.

⁹³ A. Cengel and J. Ghajar, 2011

⁹⁴ WALAS, S. Chemical process equipment. Rules thumb. 1990

Figura 64. Molino para planta piloto



Fuente: FRITSCH. En línea <https://www.fritsch.es/preparacion-de-muestras/molienda/molinos-de-corte/details/product/pulverisette-15/> Consultado 8/11/2018

4.5.3 Reactor. El reactor es uno de los equipos más importantes del proceso, debido a que es allí donde se separa la lignina de la celulosa y la hemicelulosa presentes en la hoja de maíz.

Según el estudio cinético realizado por Huang, Shi y Langrish⁹⁵, la reacción se lleva a cabo para la extracción de lignina es la hidrólisis, desarrollada a partir de la acción del KOH y en NH₄OH a condiciones de alta temperatura por un tiempo de reacción de una hora, como se describió en la sección 2.1.2.1. La ecuación 12, corresponde a la velocidad de reacción, desde la cual se parte para desarrollar el dimensionamiento del reactor.

$$\frac{dC_A}{dt} = 7,602 \times 10^2 * e^{\left(\frac{-3,577}{T}\right)} * C_A * C_B^{0,341} \quad (12)$$

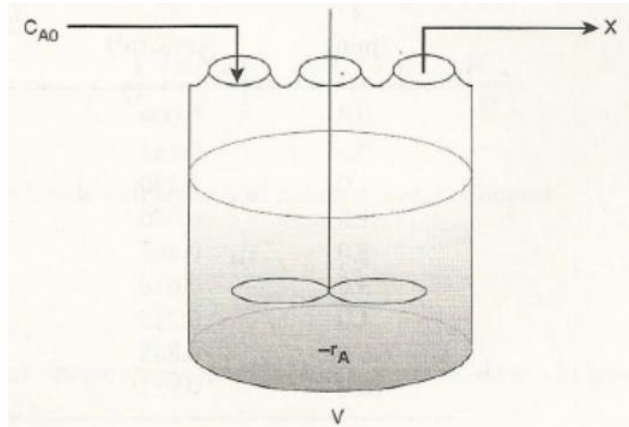
En la figura 65, se encuentra el reactor batch con las especificaciones necesarias para el proceso de dimensionamiento estipulado por Fogler⁹⁶, a partir de la cinética

⁹⁵ HUANG, Guolin. SHI, Jeffrey X. y LANGRISH, Tim A.G. NH₄OH–KOH pulping mechanisms and kinetics of rice Straw. China. 2007. En: Bioresource Technology. Vol. 98. p. 1218.

⁹⁶ FOGLER, H. Scott. Elements of chemical reaction engineering. Cuarta edición. USA. Prentice Hall. 2005. p. 125

de la reacción de hidrólisis planteada por Huang, Shi y Langrish⁹⁷, para establecer los criterios de diseño del equipo.

Figura 65. Dimensionamiento del reactor CSTR



Fuente: FOGLER, H. Scott. Elements of chemical reaction engineering. Cuarta edición. USA. Prentice Hall. 2005. p. 156.

Inicialmente con la ecuación 12 se calcula el valor de la constante de velocidad de la reacción de hidrólisis, obteniendo un valor de $-17,264.16 \text{ min}^{-1}$. De la misma ecuación de velocidad propuesta, se despeja el tiempo de reacción, quedando de la siguiente forma:

$$t = \left[\ln \left(\frac{C_A}{C_{A0}} \right) \right] * \left[- \frac{1}{k * C_B^{0.341}} \right] \quad (13)$$

El tiempo de reacción calculado con la ecuación 13 es igual a 4.2958 minutos; dato que permitió encontrar el valor de la velocidad de reacción de hidrólisis haciendo uso de la ecuación 12, arrojando un valor de 341.97 mol/L min . Ahora bien, con los valores encontrados se procede a realizar el dimensionamiento del reactor, a partir del cálculo del volumen empleando la siguiente fórmula deducida del proceso estipulado por Fogler:

$$V = \frac{N_A - N_{A0}}{r_A * t} \quad (14)$$

Empleando los valores obtenidos de los balances de masa en el cálculo de los moles de lignina, se determina que el volumen del reactor deberá ser igual a $4,9012 \text{ L}$. El desarrollo del dimensionamiento se encuentra en el anexo G.

⁹⁷ HUANG, Guolin. SHI, Jeffrey X. y LANGRISH, Tim A.G. NH₄OH–KOH pulping mechanisms and kinetics of rice Straw. Op. cit., p. 1221.

4.5.4 Filtro. Los procesos de filtrado se pueden clasificar según la velocidad con la que se acumula la torta de filtrado. Para este caso, el proceso de filtrado se da en dos momentos, al vacío y por gravedad, y en ambos casos la acumulación es lenta, debido a que la torta se forma con un espesor de 0.1 a 10cm durante al menos una hora, en el caso de la lignina se tarda más tiempo.⁹⁸

Para el dimensionamiento de un sistema de filtrado es necesario determinar la velocidad en la que se lleva a cabo el proceso, mediante la relación entre el volumen y el tiempo:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Por parámetros de diseño, la altura del filtro es 0.1 veces su área, el volumen se determina a partir de la carga del proceso anterior, es decir, los 4,8L de mezcla; los cuales son distribuidos en 6 lotes de 800ml. El tiempo establecido para esta operación está entre 3 y 7 minutos debido a que la primera fase se realiza con bomba de vacío; si el tiempo es mayor, se deberán ajustar el volumen para que sea mayor y de esta manera aumente la velocidad de filtrado.

La velocidad de filtrado es de 480ml/min con un tiempo estimado de 10 minutos. El área del filtro es de 613,05cm²; y la altura es de 17,83cm.

4.5.5 Prensa. El prensado, es un proceso final que mediante presión y temperatura permite conformar una placa uniforme de material. Las dimensiones de la prensa deben corresponder al área del aglomerado que se quiere realizar, es decir, 100cm de alto por 70cm de ancho como mínimo.

La prensa METALNOX PTS-950, encontrada en la figura 67, es un equipo de doble bandeja semi automático, que ejerce un presión y temperatura graduada. La bandeja térmica superior posee doble capa de teflón, resistencia hundida y mecanizada en aluminio y con sistema de presión igual en toda la superficie de la horma, lo que permite que el material obtenga un espesor uniforme a lo largo de toda su área.

⁹⁸ WALAS, S. Chemical process equipment. Rules of Thumb (Filtration). 1990.

Figura 66. Prensa para planta piloto



Fuente: elaboración propia

5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO

A partir del escalamiento del proceso para el desarrollo del material aglomerado, se realiza una estimación de costos de producción de una placa de 100cm X 70cm, los cuales incluyen equipos, elementos y otros costos administrativos. Este cálculo se realiza con el fin de establecer el costo del empaque por unidad y posteriormente realizar un análisis de los mismos mediante el cálculo de indicadores económicos para costos de un proceso.

5.1 COSTOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO

Para determinar qué tan viable puede ser la ejecución de esta propuesta en un ambiente comercial, se deberá realizar una evaluación de los costos tanto fijos como variables del proceso productivo en total, es decir, que se debe calcular cuánto costaría un empaque de calzado elaborado con el material obtenido en este proyecto para así mismo comparar con los que están actualmente en el mercado.

5.1.1 Costos administrativos. Los costos de la tabla 2 hacen referencia a todo lo concerniente al proceso de producción del material; ahora bien, para obtener el costo total del empaque, es necesario tener en cuenta los que se generan en la producción, es decir, personal de diseño, ensamblaje, entre otros, los cuales se encuentran especificados en la tabla 38.

Tabla 38. Costos asociados al proceso de fabricación del empaque

ELEMENTO	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Ingeniero Químico	3600000	1	\$ 3.600.000
Auxiliar de Laboratorio	1200000	1	\$ 1.200.000
Diseñador	1500000	1	\$ 1.500.000
Consumo energético de equipos (\$/kWh)	476,8331 ⁹⁹	1500	\$ 715.250
TOTAL DE COSTOS ASOCIADOS			\$ 7.015.250

Fuente: elaboración propia

⁹⁹ Tarifas generadas por Codensa para establecimientos del sector público para el mes de septiembre de 2018.

5.1.2 Costos de producción

Tabla 39. Costos de producción de material

	ELEMENTO	PROVEEDOR	CANT. VENTA	PRECIO	CANTIDAD EXPERIMENTO	CANTIDAD COMPRA	VALOR TOTAL
REACTIVOS	Hojas de Maíz	CORABASTOS	12Kg	4000	20,5	2	\$ 8.000
	Hidróxido de Amonio (30%)	MERCK COLOMBIA	2,5L	25700	4,5L	2	\$ 51.400
	Hidróxido de Potasio (Cristales)	ALFA PRODUCTOS QUIMICOS LTDA	1Kg	4150	241,87g	1	\$ 4.150
	Ácido Sulfúrico (98%)	MERCK COLOMBIA	1L	57000	386,99mL	1	\$ 57.000
	Retazos de cuero	Recolección en CMTC		0	548,75g	0	0
	PVA	RECOLCRY	500g	6900	192,32g	1	\$ 6.900
	Glicerina	QUIMICOS CAMPOTA	400ml	4000	210mL	1	\$ 4.000
	Hidróxido de Sodio (Cristales)	QUIMICOS CAMPOTA	1Kg	5600	84g	1	\$ 5.600
	Ácido Bórico	QUIMICOS CAMPOTA	1Kg	5600	105g	1	\$ 5.600
EQUIPOS	Balanza (Trumax Cap.3000g)	VIA INDUSTRIAL	1	248.000	1	1	\$ 248.000
	Horno De Secado (Mettler Cap. 57 L)	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	16660000	1	1	\$ 16.660.000
	Molino de cuchillas		1	30000000	1	1	\$ 30.000.000
	Plancha de Calentamiento con agitador magn	YARETH QUIMICOS LTDA	1	1498000	2	2	\$ 2.996.000
	Bomba de vacío (Robinair 1,5 CFM- 110V / 60 H	VIA INDUSTRIAL	1	737900	2	2	\$ 1.475.800
	Molde para placa	HORNAMENTADORA	1	50000	2	2	\$ 100.000
	Prensa Hidráulica 20Ton	DYMTTOOLS SAS COMERCIALIZADOR	1	719000	1	1	\$ 719.000
OTROS ELEMENTOS	Filtro Matraz kitasato (250ml)	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	45518	2	2	\$ 91.036
	Papel filtro (Whatman Cualitativo Gr. Standar	INSTRUMENTALIA S.A.S	100	23354	200	2	\$ 46.708
	Recipiente de almacenamiento (800ml)	ELEMENTOS QUIMICOS LTDA	1	13000	5	5	\$ 65.000
	Bureta de 100mL (50ml)	ELEMENTOS QUIMICOS LTDA	1	109000	2	2	\$ 218.000
	Soporte Universal	BIOQUIMICA CL	1	15400	2	2	\$ 30.800
	Pinzas para soporte (Plastico)	ELEMENTOS QUIMICOS LTDA	1	30400	2	2	\$ 60.800
	Vidrio reloj (80mm - Vidrio neutro)	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	5504	5	5	\$ 27.520
	Espátula	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	35700	2	2	\$ 71.400
	Micro espátula	ELEMENTOS QUIMICOS LTDA	1	29000	1	1	\$ 29.000
	Caja petri (100 x 15mm - Vidrio soda)	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	4165	10	10	\$ 41.650
	Pipeta 10mL (Graduda - Vidrio Borosilicato)	INSTRUMENTALIA S.A.S	1	9074	3	3	\$ 27.222
	Recipiente de mezclado (Jarra de 500ml)	ELEMENTOS QUIMICOS LTDA	1	7800	2	2	\$ 15.600
	TOTAL COSTOS DE PROCESO						

Fuente: elaboración propia

En la tabla 39, se realizó una estimación de los costos, evaluando las materias primas, los equipos y algunos elementos adicionales que pueden ser usados dentro del proceso productivo. Se calculó un total de \$60.081.436 para todo el proceso incluyendo el personal y demás costos.

Este procedimiento se realiza con el fin de estimar el costo de un empaque de calzado elaborado con el material aglomerado obtenido, como se describe a continuación.

5.1.3 Costo de un empaque elaborado con material aglomerado. Habiendo definido los costos de todos los procesos que intervienen en la fabricación de un empaque de calzado, se procede a realizar el cálculo del costo y precio de venta para más adelante realizar la comparación con los que están actualmente en el mercado.

El SENA como entidad no comercializa productos derivados de los proyectos que realizan, por lo tanto, se asume que dentro del proceso de elaboración de empaques no hay ingresos y tampoco gastos, lo que permite a emplear una estrategia de fijación de costos basada en la competencia para estimar el valor de una unidad basándose en el precio que manejan las empresas productoras de empaques, donde se encontró que en el sector se manejan precios desde \$800 hasta \$1400 por unidad con una cantidad mínima de venta de 50 unidades; además se indaga sobre el porcentaje de utilidad que se maneja en el mercado de empaques y se encontró que por cada unidad de \$1400 la empresa gana \$600, es decir que el margen de utilidad promedio que se maneja es de 42,86%.

Ahora bien, dividiendo los costos calculados en las tablas 38 y 39 para fabricar una sola unidad, se determina que tendría un costo de fabricación de \$34,112.53. Teniendo los datos de costos de este proceso y el margen de utilidad del mercado, se determina la ganancia que se obtendría por cada empaque aglomerado (UT) con la ecuación 13.

$$\begin{aligned} UT &= CT * \%U \\ UT &= 14620,63 \end{aligned} \tag{13}$$

Ahora, sumando la utilidad a los costos, se obtiene el precio de venta (P) con la ecuación 15:

$$P = CT + UT \tag{15}$$

$$P = 34.112,53 + 14.620,63 = 48.733,16 \text{ pesos/unidad}$$

Lo que finalmente indica que comercializar un empaque con el material aglomerado es bastante costoso, alcanzando un valor de \$48.733,16.

5.2 ANÁLISIS DE COSTOS EN LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO EN LA ELABORACIÓN DE EMPAQUES

Habiendo determinado el valor del empaque, se procede a establecer una comparación entre los que se encuentran circulando en la manufactura de empaques de calzado, para ver el comportamiento del aglomerado dentro de la industria de empaques de calzado, y de esta manera evaluar qué tan viable puede ser competir dentro de esta.

5.2.1 Costo de un empaque convencional. Como se describió en la sección 1.2, existen diferentes tipos de empaques hechos de varios materiales, siendo el cartón el de mayor influencia. Para este análisis se realizó un sondeo por las empresas comercializadoras de empaques del calzado para tener una idea del movimiento de este en el mercado y así tener un punto de comparación claro, información que se encuentra consignada en la tabla 40.

Tabla 40. Costos de empaques convencionales

NOMBRE EMPRESA	TIPO DE EMPAQUE	PRECIO
Cartonería Mosquera s.a.	Cajas, Almas de cartón, solapas, soportes de cartón, etc.	\$757 unidad, venta 1000und x \$757.000 Tamaño: 24.8 x 17.2 x 10.2
	Cajas para Calzado, Caja cofre	\$839unidad, venta 1000und x \$839.000 Tamaño: 29,5x15,5 x 9,5
D cartón	Caja tubular Caja tapa y base	\$1.351unidad, venta 1000und x \$1.351.000 Tamaño: 34 x 30 x10

Fuente: Geraldine Lozano, Investigadora SENNOVA

5.2.2 Análisis comparativo de costos de empaques. Algo que se pudo observar en la indagación de precios, es que ninguna empresa fabrica un pedido por menos de 50 unidades, ya que entre más se fabriquen, el costo de producción es menor, lo cual puede ser una herramienta para disminuir el precio del aglomerado, sin embargo, continua siendo muy costoso para una empresa de calzado.

Por otro lado, se plantea un análisis de costos mediante el cálculo de indicadores económicos que permitirán la evaluación de la elaboración de empaques de calzado como proceso productivo. Para ello se hace uso de los costos calculados en la sección 5.1 para estimar ventas y de esta manera realizar los demás cálculos pertinentes para el análisis.

Para los cálculos se definen los siguientes parámetros de costos y ventas, suponiendo que se comercialice el empaque y se genere un pequeño volumen de ventas, para poder estimar con indicadores el comportamiento del producto en el mercado:

- **Costos de producción:** se hace una suposición con respecto a la cantidad de productos necesarios para la comercialización; se toma como una industria pequeña, por lo tanto, los volúmenes de producción son bajos, para este caso se estima que se producirán 1000 para 10 clientes por cada mes, obteniendo un costo total de \$34, 112,530.
- **Ventas:** teniendo en cuenta que el precio de cada empaque es de \$48,733.53; se estima que las ventas mensuales están alrededor de \$48,733,160; los cálculos se encuentran en el anexo G.

Con estos datos, es posible calcular los siguientes indicadores, teniendo en cuenta el procedimiento descrito por Arturo Jiménez G¹⁰⁰:

- **Utilidad bruta:** se obtiene a partir de los valores de ventas y costos calculados. El valor de utilidad bruta es de \$14, 620,630 por mes si se fabrican 1000 unidades, cálculos que se encuentran en el anexo G.
- **Utilidad Neta:** según Jiménez¹⁰¹ para este indicador se toma un valor de depreciación del 10%, donde los factores e y d son iguales a 0.1 y una tasa de impuestos de 50% (t=0.5) para determinar el valor de la utilidad neta igual a \$4, 700,375; teniendo en cuenta que el valor de la inversión es de \$52, 198,800; en el anexo G se observan los cálculos.
- **Tasa de retorno:** es el indicador que mide la rentabilidad de un proceso en términos de dinero. En este proyecto se evidencia una rentabilidad muy baja del 9%, calculada en el anexo G.
- **Tiempo de recuperación de capital:** este indicador permite determinar el tiempo que tardará el inversionista en recuperar el dinero que invirtió en el proyecto, el cual para este caso es de 5 años. Cálculos que se encuentran en el anexo G.

Concluyendo, el proceso representa márgenes de utilidades muy bajas, tiempo de recuperación muy largo y rentabilidad baja.

¹⁰⁰ JIMÉNEZ G., Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Análisis económico de procesos. Celaya, México. Editorial Reverté S.A. 2003. p. 11-12.

¹⁰¹ Ibid., p. 13.

6. CONCLUSIONES

- La utilización de los residuos tanto de hojas como de cuero, tuvo un resultado satisfactorio en cuanto al cumplimiento del objetivo de reducir en una parte el impacto ambiental generado por los dos sectores industriales.
- Si se trata de analizar el comportamiento de las variables dentro del proceso de secado, molienda de hojas y de aglomerado, un diseño de superficie respuesta no es suficiente para determinar la incidencia de las mismas, por lo tanto se complementa con un análisis multivariable para determinar que los factores seleccionados influyen de manera significativa en los tres procesos.
- Los diseños de experimentos elaborados para secado, molienda de hojas y elaboración de aglomerado, determinaron que no hay incidencia de las variables seleccionadas si se modifican simultáneamente, por lo tanto, para que la pérdida de peso de las hojas, la cantidad de material en el tamiz 80 y el módulo de elasticidad se maximicen en cada operación es necesario aumentar uno solo de los factores experimentales de cada caso.
- Las pérdidas en los procesos de molienda no fueron significativas, sin embargo, haber realizado el proceso en un molino doméstico en muestras tan pequeñas retrasó la operación.
- Los procesos de secado y molienda se realizan a condiciones que no impliquen mayor gasto energético, por lo tanto, las operaciones se realizan aumentando temperatura y velocidad del molino respectivamente para obtener tiempos de operación más cortos sin afectar la eficiencia de cada proceso.
- A pesar de que ya hayan bastantes estudios de la cinética de la reacción de hidrólisis, es importante tenerla en cuenta en los parámetros de diseño y en la elaboración de los balances de masa y energía de unidad.
- Las hojas de la mazorca son una buena alternativa por la reducción de residuos, pero al ser un elemento no maderable, no presenta un porcentaje muy alto de lignina, por lo tanto, se estima que el rendimiento es muy bajo si se compara con la cantidad de lignina que se obtiene de la corteza de un árbol.
- Durante el proceso de solubilización de lignina se realizó una variación de la concentración de NH_4OH sin saber los efectos que tendría, pero al reducir la concentración a la mitad, se obtuvo la misma cantidad de lignina, de modo que, se redujeron las cantidades de hidróxido de amonio empleado y por ende se reducen en parte los costos del proceso. Además, implicó una reducción de H_2SO_4 para la precipitación de la lignina en un pH de 2, comportamiento similar si se trabaja con concentraciones más altas de NH_4OH .

- Según el análisis por espectroscopia infrarrojo, se obtuvo una especie de lignina que no fue muy similar a la lignina comercial. Este comportamiento pudo deberse al origen de las dos muestras y al método de extracción, también al durar tanto tiempo almacenada después de haber sido extraída pudo cambiar su composición debido a la humedad del ambiente en el que se encontraban.
- En los espectros del FTIR de las diferentes muestras de lignina obtenidas de las hojas de maíz, se observó un patrón muy similar en todas, lo cual confirma que las condiciones del proceso a pesar de ser variadas en algunas muestras, no afectaron en gran parte la composición y/o estructura de las ligninas.
- Los agujeros que se le formaron al material después de la fase de secado, son debido a la reducción del volumen del cuero al retirar el agua, además, es posible que si se tuviera una placa con mayor espesor, no habría aparición de estos huecos en la superficie afectando sus propiedades.
- Durante la aplicación de la prueba de tensión, se observó que los agujeros de la superficie del material afectaron negativamente en el rompimiento de la placa en la prueba, debido a que el rompimiento se originaba en las partes de la placa donde se encontraban estos agujeros y comenzaba con la mínima fuerza aplicada.
- El material obtenido no es tan rígido como se esperaba, puesto que si se compara con una caja de cartón (empaques de calzado comercial) o con la muestra de celulosa (blanco), no comparten las mismas características de resistencia; por lo tanto, si se usara así sin ninguna modificación se originarían problemas en el almacenamiento y transporte de la mercancía, corriendo con el riesgo de que el producto (calzado) sufra algún daño.
- Para efectos de diseño, la hidrólisis no puede considerarse únicamente como una fase de separación de componentes, sino que se deben tener en cuenta las reacciones que se dan durante el proceso.
- Con respecto a lo comercial, el material aglomerado no podría competir en el mercado de los empaques, puesto que su precio es muy elevado al compararlo con los que se encuentran actualmente en el sector, por lo tanto, a una empresa comercializadora de calzado no le serviría que el empaque fuera más costoso que el mismo producto, porque tendría que elevar los costos de venta afectando directamente al consumidor.
- El empaque elaborado con material reciclado, puede tener un gran impacto en la sociedad por su carácter innovador y ecológico, cumpliendo con el propósito de encontrar una alternativa para la industria del calzado que ayude a disminuir

su huella de carbono; pero el precio le resta competitividad y poder de adquisición en la industria.

- El proceso de elaboración de empaques a base de material aglomerado, no representa altas utilidades para quien lo comercializa, representado no solo en el dinero, sino en el tiempo de recuperación de capital y en la baja rentabilidad.
- El alto costo de los equipos no permitiría una evolución comercial, puesto que es muy costoso realizar un empaque si no se cuenta con el recurso.

7. RECOMENDACIONES

- Las clases de maíz son diferentes entre sí de acuerdo al lugar donde se cultivan, por lo tanto, puede existir una variación de la composición en la que se determine un mayor o menor contenido de lignina; lo cual permite recomendar que se realice un estudio comparativo entre las especies de maíz y el contenido de este biopolímero para aumentar los rendimientos en el proceso de extracción.
- Se recomienda realizar el experimento de secado, molienda de hojas y elaboración del aglomerado haciendo uso de otro diseño de experimentos para mejorar los resultados.
- Se recomienda realizar el estudio haciendo uso de otro material lignocelulósico, con el fin de aumentar rendimientos del proceso.
- Con el fin de comprobar que el método de hidrólisis alcalina da mejores resultados en la hoja de maíz, se recomienda hacer pruebas con los otros métodos para comparar el rendimiento del proceso de extracción de lignina.
- Se recomienda optimizar el proceso de extracción de lignina con el fin de mejorar el rendimiento.
- Para una evaluación completa de la lignina obtenida, se recomienda realizar otros análisis a parte del FTIR, para verificar la existencia de grupos funcionales pertenecientes a la molécula de lignina, con el fin de determinar con mayor precisión la estructura y la composición de la misma.
- Emplear equipos industriales puesto que al hacer uso de equipos domésticos, la productividad disminuye, ya que demanda más tiempo y se corre el riesgo de averiarlos.
- Es recomendable realizar más pruebas físicas al material obtenido, para evaluar otros usos que se le puedan dar en la industria.
- El espesor del material es muy pequeño para un empaque de calzado, por lo tanto se recomienda aumentar el espesor con el fin de darle más resistencia al material.
- Las proporciones de lignina y PVA de la mezcla aglomerante le dieron una característica muy plástica al material, por lo tanto, se recomienda modificar las concentraciones para mejorar la resistencia del material.
- Se recomienda evaluar la posibilidad de usar el material obtenido para otro fin, bien sea como empaque o como otro objeto.

- Se realizó un escalamiento para una placa de 100cm X 70cm, se recomienda revisar los parámetros de escalamiento para estudios posteriores.
- Los altos costos del producto impiden una competencia en el mercado, por lo tanto, se recomienda reevaluar el proceso y modificar variables que disminuyan el precio, para que sea competente en el mercado.
- Se recomienda evaluar los costos del proyecto como proceso productivo, con miras a una inmersión en el mercado de empaques.

BIBLIOGRAFÍA

ABC COLORS, *El cuero, características y utilización*. 2008 Available at: <http://www.abc.com.py/edicion-impresora/suplementos/escolar/el-cuero-caracteristica-y-utilizacion-1119866.html>.

ACOSTA, Rosa. *Cultivos tropicales : CT, Cultivos Tropicales*. El Instituto, 1979. Available at: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0258-59362009000200016 (Accessed: 18 May 2018).

ANALISIS GRANULOMETRICO Available at: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf (Accessed: 4 August 2018).

ANAYA, Alejandro y PEDROZA, Humberto. 'Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina', *Tecnología, Ciencia, Educación*. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, 2008. 23(1), pp. 30–39. Available at: <http://www.redalyc.org/html/482/48223105/> (Accessed: 3 October 2018).

ARIAS, Alejandro Jose. *ESTUDIO DE MATERIALES COMPUESTOS DE CUERO RECUPERADO AGLOMERADOS CON RESINA POLIMÉRICA*. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2013.

ASKELAND, Donald. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3rd edn. Missouri, Rolla. 1998. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1pxQHGAIXOSeX98bnzbNtTi6BzYJfVdlH/view> (Accessed: 10 October 2018).

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. ASTM D882-18. United States. 2014. 12p.

ATLAS DE HISTOLOGÍA VEGETAL Y ANIMAL. *Tejidos y órganos vegetales: Lignina*. 2018 Available at: <https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-v/ampliaciones/lignina.php>.

BASAURE, Patricio. *Maíz: Composición del rastrojo*. 2008 Available at: <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/15476.html>.

BETANCOURT, Santiago. *et al.* 'Degradación Térmica De Fibras Naturales Procedentes De La Calceta De Plátano (Estudio Cinético)', *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 2009. 1(1), pp. 215–219.

BILLMEYER, Fred y GUERRA, Areal. *Ciencia de los polímeros*. Reverté. 1975. Available at: <https://books.google.com.co/books?id=vL9QrpOKsQcC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Accessed: 7 August 2018).

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ 'Etiqueta, Empaque y Embalaje para una Exportación', *Etiqueta, Empaque y Embalaje para una Exportación*, 383. 2012. Available at: http://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14382/Guia_Practica_Empaque_y_Embalaje.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

CASAÑAS, Jorge. *ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN A BASE DE HOJAS DE MAZORCA (Zea Mays)*. Universidad de Carabobo, 2012.

CASTELLANOS, Jesus. ESPINOSA, Ruben. y ZAMORA, Alexis. 'Estimación de las propiedades relacionadas con el comportamiento energético de la biomasa'. *Bartens*. Available at: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar10/HTML/articulo01.htm> (Accessed: 7 October 2018).

CENGEL, Yanus. y

CHALA, Luis Alfonso. 'Empaques y embalajes para exportación', *Cámara de comercio de Bogotá*, 1. 2015. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

CHÁVEZ, Marvin. y DOMINE, Marcelo. 'LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL LIGNIN, STRUCTURE AND APPLICATIONS: DEPOLYMERIZATION METHODS FOR OBTAINING AROMATIC DERIVATIVES OF INDUSTRIAL INTEREST', 4(4), 2013. pp. 15–46. Available at: http://www.exeeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/ (Accessed: 25 June 2018).

CHÁVEZ, Marvin. y DOMINE, Marcelo. 'Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial', *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 2013. pp. 15–46. doi: http://www.exeeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/2013/Vol4/Nro4/3-ACI1184-13-full.pdf.

CUASPUD CÁLIZ, Olmedo Jesus. *OBTENCION DE BIOETANOL A PARTIR DE TALLOS DE MAIZ*. Universidad Nacional de Colombia, 2017. Available at: <http://bdigital.unal.edu.co/61352/1/1053790403.2017.pdf> (Accessed: 4 August 2018).

DEIANA, Ana Cristina, GRANADOS, Dolly y SARDELLA, Maria Fabiana. *INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA*. San Juan, Argentina, 2018. Available at: <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf> (Accessed: 29 September 2018).

ECOGESTOS. *La industria del calzado y su impacto ambiental*. Available at: <https://www.ecogestos.com/la-industria-del-calzado-y-su-impacto-ambiental/>.

GAITÁN, Alexander, FONTHAL, Gerardo y ARIZA, Hernando. 'Fabricación y propiedades físicas de aglomerados de Pennisetum purpureum schum, Philodendron longirrhizum y Musa acuminata', 2016. Available at: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542016000100001.

GHAJAR, Afshin. 'Transferencia de calor y masa', 2011. p. 945. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

GÓMEZ, Elkin, RÍOS, Luis y PEÑA, Juan. 'Efecto del Pretratamiento de Biomasa Maderera en el Rendimiento a Etanol', *Información tecnológica*. Centro de Información Tecnológica, 24(5), 2013. pp. 113–122. doi: 10.4067/S0718-07642013000500013.

GONZÁLEZ, Aura., HERRERA, Juan y RODRÍGUEZ, Antonio. *CARACTERIZACIÓN DE FRACCIONES DE LIGNINA EXTRAÍDAS DEL LICOR NEGRO CON SOLVENTES ORGÁNICOS*, 2007. Available at: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37329171/articulo3.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1533592223&Signature=TjTc70oM77ffOZd6HnijvOjZQFs%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DCHARACTERIZATION_OF_LIGNIN_FRACTIONS_TAK.pdf (Accessed: 6

August 2018).

GONZÁLEZ VELANDIA, Krystle Danitza. *et al.* 'EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS A EMPLEARSE EN LA ELABORACIÓN DE PAPEL', *Luna Azul*, 43, 2016. pp. 499–517. doi: 10.17151/luaz.2016.43.21.

GRANDE TOVAR, Carlos David y OROZCO COLONIA, Brigitte Sthepani. *Guillermo de Ockham revista científica, Revista Científica Guillermo de Ockham*. Universidad de San Buenaventura Cali, 2004. Available at: <http://www.redalyc.org/html/1053/105327548008/> (Accessed: 18 May 2018).

Guía Práctica Empaque y Embalaje. Available at: <http://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14382/> (Accessed: 8 May 2018).

HUANG, Guolin, SHI, Jeffrey y LANGRISH, Tim. 'A new pulping process for wheat straw to reduce problems with the discharge of black liquor', *Bioresource Technology*, 98(15), 2007. pp. 2829–2835. doi: 10.1016/j.biortech.2006.09.029.

HUANG, Guolin, SHI, Jeffrey y LANGRISH, Tim. 'NH₄OH–KOH pulping mechanisms and kinetics of rice straw', *Bioresource Technology*. Elsevier, 98(6), pp. 1218–1223. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2006.05.002.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. 153p. ISBN 978-958.8585-67-3.

IMBACHÍ-NARVÁEZ, Paola Catalina. *et al.* 'Evaluación del valor nutricional de recetas típicas elaboradas con maíz común y biofortificado en el departamento del cauca, Colombia', *Salud Pública de México*. Instituto Nacional de Salud Pública, 52(4), 2010. pp. 305–314. doi: 10.1590/S0036-36342010000400006.

IMPORTANCIA. *Importancia del maíz*, 2010. Available at: <https://www.importancia.org/maiz.php>.

INFOAGRO SYSTEMS, *El cultivo del maíz (1ra parte)*. Available at: <http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm>.

ISMAIL, Omar. *Entender el proceso de peletizado para lograr mejores resultados*, 2010. Available at: <https://www.wattagnet.com/articles/3105-entender-el-proceso-de-peletizado-para-lograr-mejores-resultados>.

JARAMILLO OCAMPO, Alexandra. *REFERENCIAL NACIONAL DE OFICIOS EN CUERO*, 2006. Available at: https://repositorio.artesantiasdecolombia.com.co/bitstream/001/2713/1/INST_2006.143.pdf (Accessed: 6 August 2018).

JIMÉNEZ, Jesus Alvaro, GORDILLO, Bibiana y VEGA, Marco Antonio. 'Modificación estructural de la lignina extraída a partir de carbones de bajo rango para la obtención de madera sintética', *Conciencias*, 15(28), 2011. pp. 68–82. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v15n28/v15n28a07.pdf> (Accessed: 4 October 2018).

LA DIRECCIÓN INTERNACIONAL DE NEGOCIOS DE LA CÁMARA DE COMERCIO DE

BOGOTÁ. 'Etiqueta, Empaque y Embalaje para una Exportación'.

LEÓN, Sandra y SANABRIA, Franklin. 'OBTENCIÓN DE RESINAS FENÓLICAS TERMOESTABLES DE LIGNINA EXTRAÍDA DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR', *UNICIENCIA*, 1988. pp. 47–52.

LI, Zhili. and GE, Yuanyuan. 'Extraction of lignin from sugar cane bagasse and its modification into a high performance dispersant for pesticide formulations', *Journal of the Brazilian Chemical Society*. Brazilian Chemical Society, 22(10), 2011. pp. 1866–1871. doi: 10.1590/S0103-50532011001000006.

MALMA, Antonio. *Peletizado de polímeros*, 2013. Available at: <https://es.slideshare.net/antonioEgoavilmalma/peletizado-de-polmeros>.

MAUREEN'DI. *Propiedades de la Chala de maíz*, 2010. Available at: <http://envasescelulosicoschalademaiz.blogspot.com.co/2010/10/propiedades-de-la-chala-de-maiz.html>.

MAYA. *El maíz, origen anatomía y usos*, 2017. Available at: <https://www.mayasl.com/maiz-origen-anatomia-usos/>.

MCCANN, Michael. 'Cuero, pieles y calzado', *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo OIT*, 2001. p. 88.1-88.13.

MINISTERIO DE COMERCIO INDUSTRIA Y TURISMO 'EMPAQUES Y EMBALAJES'. Available at: <http://cendar-repositorio.metabiblioteca.org/bitstream/001/709/5/D1SF36.pdf> (Accessed: 8 May 2018).

MONTGOMERY, Douglas. 'Métodos de superficie respuesta y otros enfoques para la optimización de procesos', in S.A. L. (ed.) *Diseño y análisis de experimentos*. 2nd edn. Arizona, USA, 2004. pp. 427–430. doi: 10.1016/S0141-3910(01)00005-2.

MORALES DE LA ROSA, Silvia. 'Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos', 2015. pp. 21–26. Available at: http://digital.csic.es/bitstream/10261/132717/1/morales_de_la_rosa_silvia.pdf.

NAVARRETE FRANCO, Gisela. 'Histología de la piel', *Revista de la Facultad de Medicina UNAM*, 2003. 46(4), pp. 130–133.

OSPINA ROJAS, Jose Gabriel. *Manual técnico del cultivo del maíz bajo buenas practicas agrícolas*, 2015. Available at: [http://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/MANUAL DEL CULTIVO DE MAIZ.pdf](http://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/MANUAL_DEL_CULTIVO_DE_MAIZ.pdf).

PACHECO-BLANCO, Bélgica, COLLADO-RUIZ, Daniel y CAPUZ-RIZO, Salvador. 'Identification of impacts of stages and materials on life cycle of footwear', *DYNA*, 82(189), 2015. pp. 134–141. doi: 10.15446/dyna.v82n189.42575.

PASTURAS DE AMERICA. *Maíz: La planta*. 2016 Available at: <http://www.pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/ensilado/maiz-planta/>.

PERRY, Robert., GREEN, Don y MALONEY, James. *PERRY Tomos I-V.pdf*. Sexta Edic., 1997.

Porras, Álvaro. 'DESCRIPCIÓN DE LA NOCIDIDAD DEL CROMO PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA CURTIEMBRE Y DE LAS POSIBLES FORMAS DE REMOVERLO', *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9228(17), 2010. Available at: <http://www.redalyc.org/pdf/750/75017164003.pdf> (Accessed: 8 May 2018).

RAE. *DLE: cuero - Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario*. Available at: <http://dle.rae.es/?id=BalPkBQ> (Accessed: 8 May 2018).

RAMÍREZ FRANCO, Herney. and ENRÍQUEZ ENRÍQUEZ, Maryeni Karina. 'Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir del procesamiento del seudotallo de plátano Lead (II) removal using lignin obtained from pseudostem banana treatment', *Acta Agron*, 2015. 64(3), pp. 209–213. doi: 10.15446/acag.v64n3.43488.

RAMÍREZ HOYOS, Ángela Maria. *REUTILIZACIÓN DE RETALES DE CUERO PARA LA ELABORACIÓN DE UNA LÍNEA DE PRODUCTOS DE MARROQUINERÍA*. UNIVERSIDAD CATÓLICA POPULAR DEL RISARALDA, 2009. Available at: <http://200.21.98.67:8080/jspui/bitstream/10785/422/1/completo.pdf> (Accessed: 20 August 2018).

REALES, Juan., CASTAÑO, Hader y ZAPATA, Jose 'Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico sobre la Deslignificación de Tallos de Yuca', *Información tecnológica*. Centro de Información Tecnológica, 2016. 27(3), pp. 11–22. doi: 10.4067/S0718-076420160003000003.

REYES, Anderson y VEGA, Magali. *INFLUENCIA DEL POLVO ESMERILADO DE CUERO, ALCOHOL POLIVINÍLICO Y ÁCISO BÓRICO EN LA FABRICACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON CAPACIDAD HIGROSCÓPICA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO, 2016. Available at: http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/1843/Reyes_Paredes%2C_Anderson_Junior.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Accessed: 4 October 2018).

RIVAROLA, Andrea. 'USO DE MATERIALES RECUPERADOS PARA LA CONFORMACIÓN DE PLACAS DE AGLOMERADO UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DEL MUEBLE', 9, 2005. Available at: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2005/2005-t009-a004.pdf> (Accessed: 18 May 2018).

ROBERTS, L. *et al.* 'Razas de maíz en Colombia. Boletín técnico (2)', *Ministerio de Agricultura de Colombia*, 1957.

GRUPO SACSA. *Diferentes partes de una planta de maíz*, 2015. Available at: <http://www.gruposacsa.com.mx/diferentes-partes-de-una-planta-de-maiz/>.

SALGAR, Lina Maria. 'El cultivo de maíz en colombia', 22/23, 2005. Available at: <http://www.semillas.org.co/es/el-cultivo-de-maz-en-colombia>.

SALINAS, Francisco Agustin. *EVALUACIÓN OPERACIONAL DE UN SISTEMA DE MOLIENDA MOLINO DE BOLAS HARDINGE PARA MANTENER LA EFICIENCIA Y LA CLASIFICACIÓN DEL MINERAL EN LA EMPRESA MINALTA S.A. DEL CANTÓN ZARUMA, PROVINCIA DE EL ORO EN EL AÑO 2014*. Machala, El Oro, Ecuador, 2015. Available at: http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/2856/1/CD000006-TRABAJO_COMPLETO-pdf (Accessed: 4 October 2018).

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. *Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá. Enfoque en vertimientos y residuos*, 2015. Available at: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Guía+de+producción+más+limpia+para+el+sector+curtiembres+de+Bogotá.+Enfoque+en+vertimientos+y+residuos.pdf>.

TORRAS PAPEL S.A. *Formación Fabricación de papel*. BARCELONA, 2008. Available at: www.torraspapel.com (Accessed: 10 October 2018).

TORREGOSA, M. 'Razas de maíz en la Costa Atlántica colombiana', *Universidad Nacional*, 1957.

TREVIÑO, J., HERNÁNDEZ, T. y CABALLERO, R. 'Estudio del valor nutritivo de las hojas y tallo del maíz híbrido de tallo azucarado E-ID', *Instituto de Alimentación y Producción Animal (CSIC) Madrid*, p. 7. 1957, 2011.

TURUNEN, Marko. *et al.* 'Modification of phenol-formaldehyde resol resins by lignin, starch, and urea', *Journal of Applied Polymer Science*. Wiley-Blackwell, 88(2), 2003. pp. 582–588. doi: 10.1002/app.11776.

VALLEJO, Sonia. *Composición química de la piel*, 2018. Available at: <https://es.scribd.com/doc/226656923/Composicion-Quimica-de-La-Piel>.

VILLALBA VIDALES, Jorge Armando y ARZOLA DE LA PEÑA, Nelson. 'Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa', *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte*, 33(2), 2015. pp. 301–330. doi: 10.14482/inde.33.2.5674.

WALAS, Stanley 'Chemical process equipment', *Chemical Process Equipment: Selection and design*, pp. 208–211, 1990.

ANEXOS

**ANEXO A
REGISTRO DE DATOS DEL PROCESO DE TAMIZADO**

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 1 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 2 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 3 (g)	% RETENCIÓN
10	0,059	0,773	10	0,106	1,250	10	1,936	41,527
80	6,637	86,940	80	7,559	89,118	80	2,712	58,172
FONDOS	0,938	12,287	FONDOS	0,817	9,632	FONDOS	0,014	0,300
Total	7,634		Total	8,482		Total	4,662	

a)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 4 (g)	% RETENCIÓN
10	0,31	3,937
80	7,198	91,415
FONDOS	0,366	4,648
Total	7,874	

b)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 5 (g)	% RETENCIÓN
10	0,032	0,410
80	6,913	88,549
FONDOS	0,862	11,041
Total	7,807	

c)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 6 (g)	% RETENCIÓN
10	0,062	0,817
80	6,391	84,258
FONDOS	1,132	14,924
Total	7,585	

d)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 7 (g)	% RETENCIÓN
10	0,008	0,102
80	7,434	95,125
FONDOS	0,373	4,773
Total	7,815	

e)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 8 (g)	% RETENCIÓN
10	0,664	8,380
80	7,117	89,816
FONDOS	0,143	1,805
Total	7,924	

f)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 9 (g)	% RETENCIÓN
10	0,029	0,370
80	7,594	96,875
FONDOS	0,216	2,755
Total	7,839	

g)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 10 (g)	% RETENCIÓN
10	0,121	1,220
80	9,6	96,813
FONDOS	0,195	1,967
Total	9,916	

h)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 11 (g)	% RETENCIÓN
10	0,103	1,349
80	7,104	93,057
FONDOS	0,521	6,825
Total	7,728	

i)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 12 (g)	% RETENCIÓN
10	0,327	4,321
80	7,011	92,652
FONDOS	0,229	3,026
Total	7,567	

j)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 13 (g)	% RETENCIÓN
10	3,149	77,965
80	0,889	22,010
FONDOS	0,001	0,025
Total	4,039	

k)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 14 (g)	% RETENCIÓN
10	0,531	6,958
80	6,788	88,941
FONDOS	0,313	4,101
Total	7,632	

l)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 15 (g)	% RETENCIÓN
10	0,093	1,233
80	6,952	92,140
FONDOS	0,5	6,627
Total	7,545	

m)

n)

o)

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 16 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 17 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 18 (g)	% RETENCIÓN
10	0	0,000	10	0,011	0,145	10	0,305	3,982
80	6,665	87,651	80	6,342	83,557	80	6,927	90,431
FONDOS	0,939	12,349	FONDOS	1,237	16,298	FONDOS	0,428	5,587
Total	7,604		Total	7,59		Total	7,66	

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 19 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 20 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 21 (g)	% RETENCIÓN
10	0,025	0,323	10	0,103	1,308	10	0,014	0,182
80	6,926	89,437	80	7,072	89,826	80	7,123	92,687
FONDOS	0,793	10,240	FONDOS	0,698	8,866	FONDOS	0,548	7,131
Total	7,744		Total	7,873		Total	7,685	

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 22 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 23 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 24 (g)	% RETENCIÓN
10	0,172	2,242	10	4,207	55,392	10	0,339	4,379
80	7,004	91,305	80	3,352	44,134	80	7,081	91,462
FONDOS	0,495	6,453	FONDOS	0,036	0,474	FONDOS	0,322	4,159
Total	7,671		Total	7,595		Total	7,742	

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 25 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 26 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 27 (g)	% RETENCIÓN
10	0,043	0,563	10	0,015	0,195	10	0,027	0,353
80	6,968	91,240	80	6,753	87,667	80	6,757	88,442
FONDOS	0,626	8,197	FONDOS	0,935	12,138	FONDOS	0,856	11,204
Total	7,637		Total	7,703		Total	7,64	

MALLA	PESO DE LA MUESTRA 28 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 29 (g)	% RETENCIÓN	MALLA	PESO DE LA MUESTRA 30 (g)	% RETENCIÓN
10	0,737	18,402	10	0,101	2,365	10	0,299	7,030
80	3,175	79,276	80	3,955	92,623	80	3,776	88,784
FONDOS	0,093	2,322	FONDOS	0,214	5,012	FONDOS	0,178	4,185
Total	4,005		Total	4,27		Total	4,253	

bb)

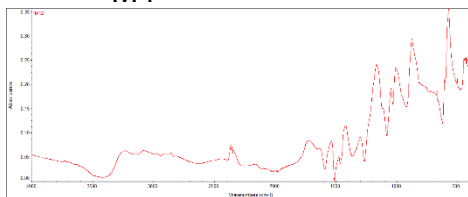
cc)

dd)

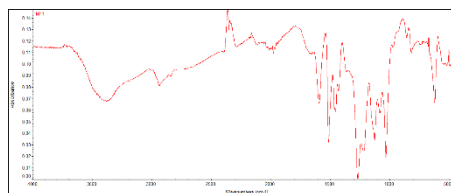
MALLA	PESO TOTAL (g)	% RETENCIÓN
10	8,97	4,17378195
80	191,981	89,3296357
FONDOS	13,962	6,49658234
Total	214,913	

ANEXO B ESPECTROSCOPIA INFRARROJO PARA MUESTRAS DE LIGNINA

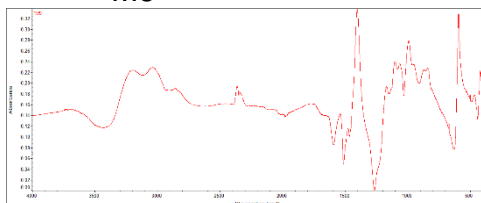
• M4



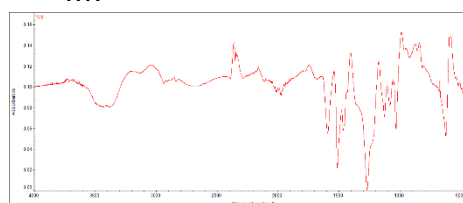
M5



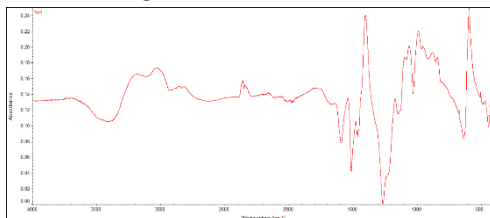
• M6



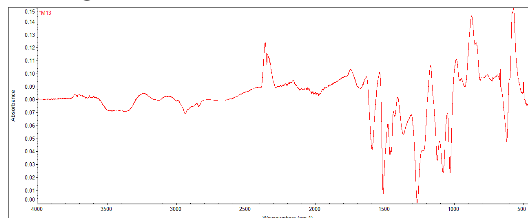
M7



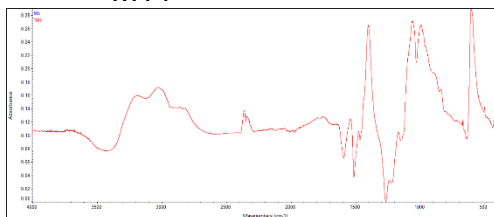
• M8



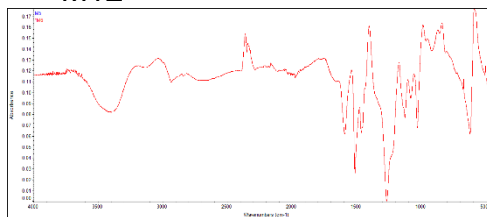
M9



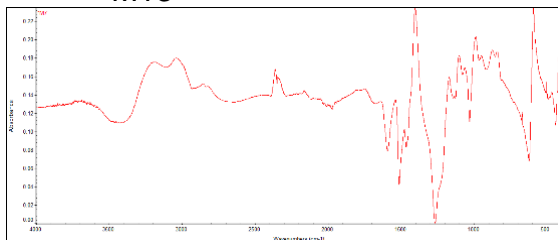
• M11



M12

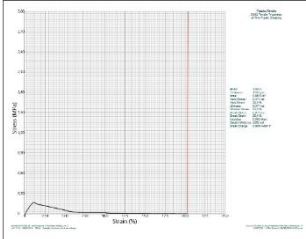


• M13

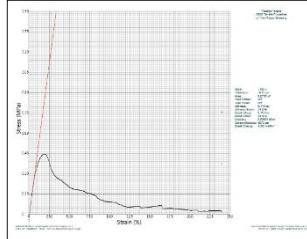


ANEXO C GRÁFICAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN PARA CADA MUESTRA EN PRUEBA DE TENSIÓN

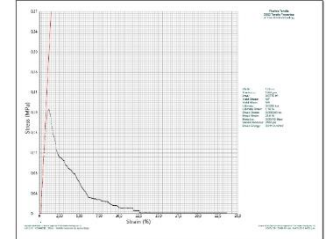
• Muestra2



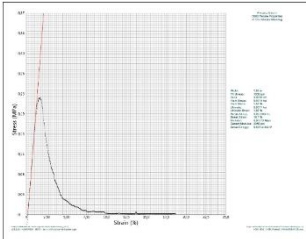
Muestra3



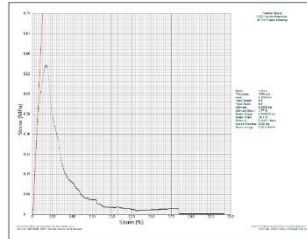
Muestra4



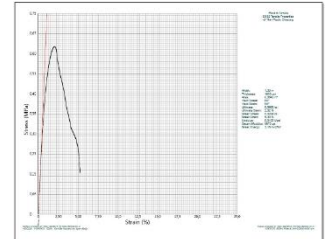
• Muestra5



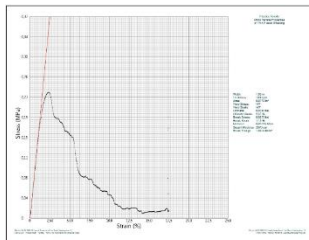
Muestra6



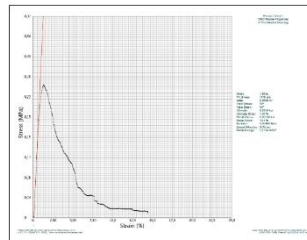
Muestra7



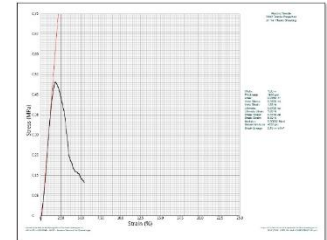
• Muestra8



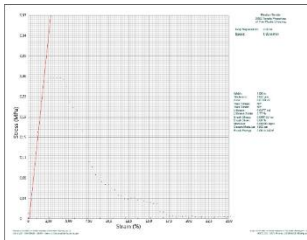
Muestra9



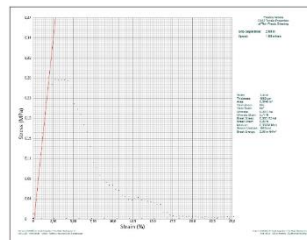
Muestra10



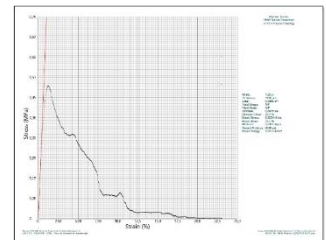
• Muestra11



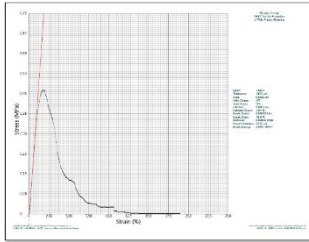
Muestra12



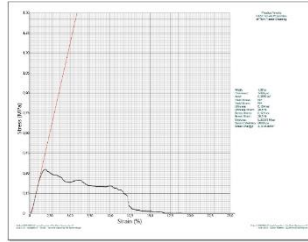
Muestra13



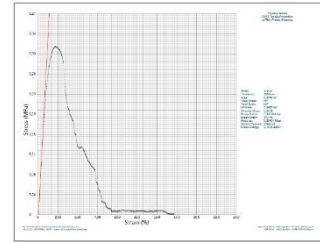
• Muestra14



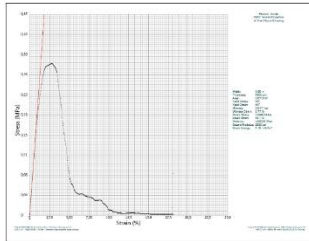
Muestra15



Muestra16



• Muestra17



**ANEXO D
BALANCES DE MASA Y ENERGÍA DE CADA OPERACIÓN**

- **BALANCES DE MASA**
 - ✓ **Secado de ameros:**

Del Balance global:

$$F_1 = F_2 + F_3$$

$$F_2 = F_1 - F_3$$

$$F_3 = (200 - 47,184)g$$

$$F_3 = 152,816 g$$

Del balance del Amero, asumiendo que salga totalmente seco:

$$X_1 F_1 = X_2 F_2$$

Del balance del Agua, asumiendo que el agua retirada es pura:

$$Y_1 F_1 = Y_2 F_2 + Y_3 F_3 \qquad Y_1 = \frac{F_3}{F_1}$$

$$Y_1 F_1 = F_3 \qquad Y_1 = \frac{152,816 g}{200 g} = 0,7641$$

$$X_2 = \frac{X_1 F_1}{F_2} \qquad X_1 F_1 = X_2 F_2 \qquad X_1 = 1 - Y_1$$

$$X_2 = \frac{0,2359 (200 \text{ g})}{47,184 \text{ g}}$$

$$X_2 = 0,9999$$

$$X_1 = 1 - 0,7641$$

$$X_1 = 0,2359$$

✓ **Molienda de Ameros:**

Del balance global:

$$F_2 = F_4 + F_5 + F_6$$

$$F_6 = F_4 - F_5 - F_2$$

$$F_7 = (47,184 - 43,765 - 1,585)g$$

$$F_7 = 1,834 \text{ g}$$

✓ **Hidrólisis:**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m_{Licor} = 240 \text{ ml} * 1,083 \text{ g/ml}$$

$$m_{Licor} = 259,92 \text{ g}$$

Del balance global:

$$F_8 = F_9 + F_{10}$$

$$F_9 = (382,25 - 32,512)g$$

$$F_8 = 349,74 \text{ g}$$

Del balance de la lignina:

$$X_L^8 F_8 = X_L^9 F_9$$

$$X_L^9 = \frac{X_L^8 F_8}{F_9}$$

$$X_L^9 = \frac{0,0150 * 382,25 \text{ g}}{349,74 \text{ g}} = 0,0164$$

Del balance de la celulosa:

$$X_C^8 F_8 = X_C^{10} F_{10}$$

$$X_C^{10} = \frac{X_C^8 F_8}{F_{10}}$$

$$X_C^{10} = \frac{0,0196 * 382,25 \text{ g}}{32,512 \text{ g}} = 0,2304$$

Del balance de la hemicelulosa:

$$X_H^{10} F_{10} = X_H^8 F_8$$

$$X_H^{10} = \frac{X_H^8 F_8}{F_{10}}$$

$$X_H^{10} = \frac{0,0046 * 382,25 \text{ g}}{32,512 \text{ g}} = 0,0558$$

Del balance del KOH:

$$\begin{aligned}X_{KOH}^8 F_8 &= X_{KOH}^9 F_9 \\X_{KOH}^9 &= \frac{X_{KOH}^8 F_8}{F_9} \\X_{KOH}^9 &= \frac{0,0033 * 382,25g}{349,74g} = 0,0036\end{aligned}$$

Del balance del NH₄OH:

$$\begin{aligned}X_{Amon}^7 F_7 &= X_{Amon}^8 F_8 \\X_{Amon}^8 &= \frac{X_{Amon}^7 F_7}{F_8} \\X_{Amon}^8 &= \frac{0,9965 * 357,25g}{382,25g} = 0,9313\end{aligned}$$

✓ **Filtrado 1:**

Del balance global:

$$\begin{aligned}F_7 + F_4 &= F_8 \\F_8 &= (357,25 + 25)g\end{aligned}$$

$$F_8 = 382,25 g$$

Del balance de la lignina:

$$\begin{aligned}X_L^4 F_4 &= X_L^8 F_8 \\X_L^8 &= \frac{X_L^4 F_4}{F_8} \\X_L^8 &= \frac{0,23 * 25g}{382,25g} = 0,0150\end{aligned}$$

Del balance de la celulosa:

$$\begin{aligned}X_C^4 F_4 &= X_C^8 F_8 \\X_C^8 &= \frac{X_C^4 F_4}{F_8} \\X_C^8 &= \frac{0,3 * 25g}{382,25g} = 0,0196\end{aligned}$$

Del balance de la hemicelulosa:

$$\begin{aligned}X_H^4 F_4 &= X_H^8 F_8 \\X_H^8 &= \frac{X_H^4 F_4}{F_8} \\X_H^8 &= \frac{0,07 * 25g}{382,25g} = 0,0046\end{aligned}$$

Del balance del KOH:

$$X_{KOH}^7 F_7 = X_{KOH}^8 F_8$$

$$X_{KOH}^8 = \frac{X_{KOH}^7 F_7}{F_8}$$

$$X_{KOH}^8 = \frac{0.0035 * 357.25g}{382.25g} = 0.0033$$

Del balance del NH₄OH:

$$X_{Amon}^7 = (1 - X_L^9 - X_{KOH}^9)$$

$$X_{Amon}^7 = 0,9106$$

✓ **Extracción:**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m_{\text{Ácid}} = 2ml * 1,84 \text{ g/ml}$$

$$m_{\text{Licor}} = 3,68g$$

Del balance global:

$$F_9 + F_{11} = F_{12}$$

$$F_{12} = (349,74 + 3,68)g$$

$$F_8 = 346,06g$$

Del balance de la lignina:

$$X_L^9 F_9 = X_L^{12} F_{12}$$

$$X_L^{12} = \frac{X_L^9 F_9}{F_{12}}$$

$$X_L^{12} = \frac{0,0558 * 349,74g}{346,06g} = 0,0564$$

Del balance del KOH:

$$X_{KOH}^9 F_9 = X_{KOH}^{12} F_{12}$$

$$X_{KOH}^{12} = \frac{X_{KOH}^9 F_9}{F_{12}}$$

$$X_{KOH}^{12} = \frac{0,0036 * 349,74g}{346,06g} = 0,0036$$

Del balance del NH₄OH:

$$X_{Amon}^9 F_9 = X_{Amon}^{12} F_{12}$$

$$X_{Amon}^{12} = \frac{X_{Amon}^9 F_9}{F_{12}}$$

$$X_{Amon}^{12} = \frac{0,9106 * 349,74g}{346,06g} = 0,9203$$

Del balance de H₂SO₄:

$$F_{11} = X_{\text{Ácid}}^{12} F_{12}$$

$$X_{\text{Ácid}}^{12} = \frac{F_{11}}{F_{12}}$$

$$X_L^8 = \frac{3,68g}{346,06g} = 0,0106$$

✓ **Filtrado 2:**

Del balance global:

$$F_{12} = F_{13} + F_{14}$$

$$F_{14} = (346,06 - 7,016)g$$

$$F_8 = 339,04g$$

✓ **Secado de lignina:**

Del balance global:

$$F_{13} = F_{15} + F_{16}$$

$$F_{16} = (7,016 + 1,1065)g$$

$$F_8 = 5,9095g$$

Del balance de la lignina:

$$X_L^{13} F_{13} = X_L^{15} F_{15}$$

$$X_L^{13} = \frac{F_{15}}{F_{13}}$$

$$X_L^{13} = \frac{1,1065g}{7,016g} = 0,1577$$

Del balance del Agua:

$$X_A^{13} F_{13} = X_A^{16} F_{16}$$

$$X_A^{13} = \frac{F_{16}}{F_{13}}$$

$$X_{KOH}^{12} = \frac{5,9095g}{7,016g} = 0,8545$$

✓ **Molienda de cuero:**

Del Balance global:

$$F_1 = F_2 + F_3$$

$$F_2 = F_1 - F_3$$

$$F_2 = (30 - 28,7015)g$$

$$F_3 = 1,2985g$$

✓ **Mezclado:**

Del Balance global:

$$F_1 = F_2$$

$$F_2 = 33,23g$$

Para la determinación de la composición, se toman los flujos de cada componente y el flujo total. Tener en cuenta que la composición es la misma a la entrada y a la salida del mezclado:

$$X_L^1 = \frac{F_{Lig}}{F_{Total}} = \frac{2,03g}{33,23g} = 0,0611$$

$$X_{Agua}^1 = 0,6019 \quad X_{NaOH}^1 = 0,0241 \quad X_{PVA}^1 = 0,0566 \quad X_{Ac.Bo}^1 = 0,0301 \quad X_{Glice}^1 = 0,0758$$

$$X_{Cuero}^1 = 0,1505$$

✓ **Pre-secado:**

Del Balance global:

$$\begin{aligned} F_2 &= F_3 + F_4 \\ F_4 &= F_2 - F_3 \\ F_2 &= (33,23 - 20,317)g \\ F_3 &= 12,913g \end{aligned}$$

Del balance del agua:

$$\begin{aligned} Y_{Ag}^2 F_2 &= Y_{Ag}^4 F_4 + Y_{Ag}^3 F_3 \\ Y_{Ag}^3 &= \frac{(Y_{Ag}^2 F_2) - F_4}{F_3} \\ Y_{Ag}^3 &= 0,3489 \end{aligned}$$

Del balance de la lignina:

$$\begin{aligned} X_L^2 F_2 &= X_L^3 F_3 \\ X_L^3 &= \frac{X_L^2 F_2}{F_3} \\ X_L^3 &= 0,0999 \end{aligned}$$

Del balance de NaOH:

$$\begin{aligned} X_{NaOH}^2 F_2 &= X_{NaOH}^3 F_3 \\ X_{NaOH}^3 &= \frac{X_{NaOH}^2 F_2}{F_3} \\ X_{NaOH}^3 &= 0,0394 \end{aligned}$$

Del balance del PVA:

$$\begin{aligned} X_{PVA}^2 F_2 &= X_{PVA}^3 F_3 \\ X_{PVA}^3 &= \frac{X_{PVA}^2 F_2}{F_3} \\ X_{PVA}^3 &= 0,0926 \end{aligned}$$

Del balance del ácido bórico:

$$X_{Ac.Bo}^2 F_2 = X_{Ac.Bo}^3 F_3$$

$$X_{Ac.Bo}^3 = \frac{X_{Ac.Bo}^2 F_2}{F_3}$$

$$X_{Ac.Bo}^3 = 0,0492$$

Del balance de la glicerina:

$$X_{Glic}^2 F_2 = X_{Glic}^3 F_3$$

$$X_{Glic}^3 = \frac{X_{Glic}^2 F_2}{F_3}$$

$$X_{Glic}^3 = 0,1240$$

Del balance del cuero:

$$X_{Cuero}^2 F_2 = X_{Cuero}^3 F_3$$

$$X_{Cuero}^3 = \frac{X_{Cuero}^2 F_2}{F_3}$$

$$X_{Cuero}^3 = 0,2462$$

✓ **Secado del aglomerado:**

Del Balance global:

$$F_5 = F_6 + F_7$$

$$F_6 = F_5 - F_7$$

$$F_6 = (20,317 - 7,0886)g$$

$$F_6 = 13,2284g$$

Del balance del agua:

$$Y_{Ag}^5 F_5 = Y_{Ag}^7 F_7$$

$$F_7 = Y_{Ag}^5 F_5$$

$$F_7 = 7,0886g$$

Del balance de la lignina:

$$X_L^5 F_5 = X_L^6 F_6$$

$$X_L^6 = \frac{X_L^5 F_5}{F_6}$$

$$X_L^6 = 0,1534$$

Del balance de NaOH:

$$X_{NaOH}^5 F_5 = X_{NaOH}^6 F_6$$

$$X_{NaOH}^6 = \frac{X_{NaOH}^5 F_5}{F_6}$$

$$X_{NaOH}^6 = 0,0605$$

Del balance del PVA:

$$X_{PVA}^5 F_5 = X_{PVA}^6 F_6$$

$$X_{PVA}^6 = \frac{X_{PVA}^5 F_5}{F_6}$$

$$X_{PVA}^6 = 0,1422$$

Del balance del ácido bórico:

$$X_{Ac.Bo}^5 F_5 = X_{Ac.Bo}^6 F_6$$

$$X_{Ac.Bo}^6 = \frac{X_{Ac.Bo}^5 F_5}{F_6}$$

$$X_{Ac.Bo}^6 = 0,0756$$

Del balance de la glicerina:

$$X_{Glic}^5 F_5 = X_{Glic}^6 F_6$$

$$X_{Glic}^6 = \frac{X_{Glic}^5 F_5}{F_6}$$

$$X_{Glic}^6 = 0,1904$$

Del balance del cuero:

$$X_{Cuero}^5 F_5 = X_{Cuero}^6 F_6$$

$$X_{Cuero}^6 = \frac{X_{Cuero}^5 F_5}{F_6}$$

$$X_{Cuero}^6 = 0,3781$$

➤ BALANCES DE ENERGÍA

✓ Secado

$$Q = AH$$

$$Q = mC_p(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,2Kg(357,29 - 293,15)K Cp$$

$$Q = 0,2Kg(64,14 K) * Cp$$

$$Q = 0,2Kg(64,14 K)(\chi_H Cp_H + \chi_{Cel} Cp_{Cel} + \chi_{Lig} Cp_{Lig} + \chi_{Ag} Cp_{Ag})$$

$$Q = 0,2Kg(64,14 K)(0,07 + 0,545 + 0,3 + 0,691 + 0,23 + 0,659 + 0,4 + 4,183)Kg/Kg K$$

$$Q = 0,2Kg(64,14 K)(2,0737 Kg/Kg K)$$

$$Q = 26,60 K$$

✓ Molienda

$$W = W (Molino)$$

$$W = 350W$$

✓ Hidrólisis

$$T_2 = 110^\circ C = 383,15 K$$

$$T_1 = 20^\circ C = 293,15 K$$

$$Q = mC_p AT$$

$$Q = 0,025Kg(383,15k - 293,15k)Cp$$

$$Q = 0,025Kg(90k)(0,0392 * 2,0737 + 0,0033 * 0,00157 + 0,9313 * 0,0010)Kg/Kg k$$

$$Q = 0,025Kg * 90Kg * 0,0822 Kg/Kg k$$

$$Q = 0,1850Kg$$

✓ **Filtración**

$$W = W(Bomba)$$

$$W = 2237W$$

✓ **Extracción**

$$T_2 = 34^{\circ}C = 307,15k$$

$$T_1 = 20^{\circ}C = 293,15k$$

$$Q = m Cp(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,350Kg - (307,15 - 293,15)k * Cp$$

$$Q = 0,350Kg(14k)(0,0364 + 0,659 + 0,0007 + 0,9203 + 0,0010 + 0,0106 + 0,00142)Kg/Kgk$$

$$Q = 0,350Kg 14k * 0,0382Kg/Kg k$$

$$Q = 0,1874Kg$$

✓ **Secado**

$$T_2 = 60^{\circ}C = 333,15k$$

$$Cp L = 0,659Kg/Kgk$$

$$T_1 = 20^{\circ}C = 293,15k$$

$$Cp Ag = 4,183Kg/Kgk$$

$$m = 7,016g = 0,0716Kg$$

$$Q = m Cp(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,0176Kg(333,15 - 293,15)k (0,1577 * 0,659 + 0,8545 * 4,183)Kg/Kgk$$

$$Q = 0,0176Kg(40k) * 2,5489Kg/Kgk$$

$$Q = 7,30000Kg$$

✓ **Mezcla**

$$T_2 = 70^{\circ}C = 343,15k$$

$$T_1 = 20^{\circ}C = 293,15k$$

$$m = 32,83g = 0,03283Kg$$

$$Q = m Cp(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,03283Kg(343,15 - 293,15)k * Cp$$

$$Q = 0,03283Kg(50k)(0,1505 * 1,5 + 0,0566 * 1,6329 + 0,0611 * 0,659 + 0,6241 * 0,00149 + 0,0301 * 1,3172 + 0,0758 * 2,430 + 0,6019 * 4,183)Kg/Kgk$$

$$Q = 0,03283Kg(50k)(3,1001Kg/Kgk)$$

$$Q = 5,0888Kg$$

✓ Pre-secado

$$T_2 = 100^\circ C = 373,15k$$

$$T_1 = 20^\circ C = 293,15k$$

$$m = 37,83g = 0,0387Kg$$

$$Q = m Cp(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,0378Kg(373,15 - 193,15)k * (0,6019 * 4,183 + 0,0566 * 1,6329 + 0,0611 * 0,659 + 0,0241 * 0,00149 + 0,0301 * 1,3172 + 0,0758 * 2,430 + 0,1505 * 1,5)$$

$$Q = 0,0378Kg(80k)(3,1001Kg/Kgk)$$

$$Q = 9,3747Kg$$

✓ Secado

$$T_2 = 60^\circ C = 333,15k$$

$$T_1 = 20^\circ C = 293,15k$$

$$m = 20,317g = 0,020317Kg$$

$$Q = m Cp(T_2 - T_1)$$

$$Q = 0,020317Kg(333,15 - 293,15)k(0,3489 * 4,183 + 1,6329 + 0,0999 * 0,659 + 0,0394 * 0,00149 + 0,0492 * 1,3172 + 0,1240 * 2,430 + 0,2462 * 1,5)$$

$$Q = 0,020317Kg(40k)(2,4120Kg/Kgk)$$

$$Q = 1,9602Kg$$

ANEXO E

CÁLCULOS DE ESCALAMIENTO DEL PROCESO PARA PLANTA PILOTO

• OBTENCIÓN DE LIGNINA

✓ Amero Seco y Molido:

$$214,10g \text{ Lignina} \left(\frac{25g \text{ Amero}}{1,1065g \text{ Lignina}} \right) = 4837,32g \approx 4,8kg \text{ de Amero Seco}$$

✓ **Hojas de Maíz:**

$$4837,32g \text{ Am Seco} \left(\frac{200g \text{ Amero}}{47,184g \text{ Ame Seco}} \right) = 20504,07g \approx 20,5kg \text{ Hojas Maíz}$$

✓ **NH₄OH (30%):**

$$4837,32g \text{ Am. Seco} \left(\frac{23,36ml \text{ NH}_4\text{OH}}{25g \text{ Amero Seco}} \right) = 4519,99ml \approx 4,5L \text{ NH}_4\text{OH}(30\%)$$

✓ **KOH:**

$$4837,32g \text{ Ame. Seco} \left(\frac{1,25g \text{ KOH}}{25g \text{ Am. Seco}} \right) = 241,87g \text{ KOH}$$

✓ **H₂SO₄ (98%):**

$$4837,32g \text{ Ame. Seco} \left(\frac{2ml \text{ H}_2\text{SO}_4}{25g \text{ Ame. Seco}} \right) = 386,99ml \text{ H}_2\text{SO}_4$$

• **OBTENCIÓN DE CUERO:**

$$214,10g \text{ Lig} \left(\frac{5g \text{ Cuero}}{2,03904g \text{ Lig}} \right) = 525g \text{ Cuero}$$

✓ **Retazos Cuero**

$$525g \text{ Polv Cuero} \left(\frac{30g \text{ Retazos}}{28,7015g \text{ Polv Cuero}} \right) = 548,75g \text{ Retazos Cuero}$$

• **OBTENCIÓN DE AGLOMERADO:**

$$525g \text{ Cuero} \left(\frac{1,8316ml \text{ PVA}}{5g \text{ Cuero}} \right) = 192,32ml \text{ PVA}$$

✓ **Glicerina:**

$$525g \text{ Cuero} \left(\frac{2ml \text{ Glicerina}}{5g \text{ Cuero}} \right) = 210ml \text{ Glicerina}$$

✓ **Solución NaOH (4%):**

$$525g \text{ Cuero} \left(\frac{20ml \text{ Sln NaOH}}{5g \text{ Cuero}} \right) = 2100ml \text{ Sln} \approx 2,1L \text{ Sln NaOH (4\%)}$$

✓ **NaOH:**

$$2100ml \text{ Sln NaOH} \left(\frac{0,8g \text{ NaOH}}{20ml \text{ Sln Na OH}} \right) = 84g \text{ Na OH}$$

✓ **Ácido Bórico:**

$$525g \text{ Cuero} \left(\frac{1g \text{ Ácido Bórico}}{5g \text{ Cuero}} \right) = 105g \text{ Ácido Bórico}$$

ANEXO F
CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PARA PLANTA PILOTO

• **Horno**

$$100cm \left(\frac{50anc}{80cmalt} \right) = 160cm$$

$$V = 100 * 160 * 70 = 1.120.000cm^3 = 1120L$$

$$Q_{(Secado)} = 1,9602Kg \longrightarrow \text{Para placa de } 10 \times 10$$

$$m = 8,130g$$

$$\rho_{mat} = 0,4123g/ml$$

$$V_{(Nuevo)} = 100 \times 70 \times 0,2$$

$$m_{nuevo} = 0,86583Kg$$

$$\text{Para la placa de } 10 \times 10, m = 8,130g = 0,00813Kg$$

$$q = \frac{Q}{m} = \frac{1,9602kJ}{0,00813kg} = 241,11 \text{ kJ/kg}$$

$$0,86583Kg \left(\frac{241,11 \text{ kJ/kg}}{0,00813Kg} \right) = 2567,78 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = 0,86583Kg * 2567,78 \text{ kJ/kg} = 2223,26kJ \quad Q(\text{Placa } 100 \times 70)$$

• **Reactor**

Para el cálculo de la constante de velocidad se tiene que:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{7,602 \times 10^2 * e^{\frac{-3577}{T}} * C_A * C_B^{0,341}}{k}$$

Entonces:

$$k = 7,602 \times 10^2 * e^{\frac{-3577}{428,15K}} = 17.264,16 \text{ min}^{-1}$$

Para el cálculo del tiempo de reacción:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k * C_A * C_B^{0,341}$$

$$\int_{C_{Ao}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = \int_{t_0}^t -kC_B dt$$

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_{Ao}}\right) = -kC_B t$$

$$t = \left[\ln\left(\frac{C_A}{C_{Ao}}\right) \right] * \left[-\frac{1}{k * C_B^{0,341}} \right]$$

$$t = \left[\ln\left(\frac{0,0265 \text{ mol/L}}{0,4259 \text{ mol/L}}\right) \right] * \left[-\frac{1}{17264,16 \text{ min}^{-1} * 0,0561^{0,341}} \right] = 4,2958 \text{ min}$$

Con los valores de la constante y el tiempo de reacción, la velocidad es:

$$-r_A = kC_A C_B^{0,341}$$

$$-r_A = -17264,16 \text{ min}^{-1} * 0,0265 * 0,4259^{0,341} = 341,97 \text{ mol/L min}$$

Finalmente para el cálculo del volumen:

$$\frac{1}{V} * \frac{dN_A}{dt} = r_A$$

$$\frac{1}{V} \int_{N_{Ao}}^{N_A} dN_A = r_A \int_{t_0}^t dt$$

$$\frac{1}{V} (N_A - N_{Ao}) = r_A t$$

$$V = \frac{N_A - N_{Ao}}{r_A t} = \frac{(0,0106 - 0,0034) \text{ mol}}{341,97 \text{ mol/L min} * 4,2958 \text{ min}} = 4,9012 \text{ L}$$

- **Filtro**

$$m_{\text{lote}} = \frac{4800 \text{ g}}{6 \text{ lot}} = 800 \text{ g}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{4000 \text{ cm}^3}{10 \text{ min}} = 480 \text{ cm}^3 / \text{min}$$

$$h = \sqrt{0,1A}$$

$$V = h * A$$

$$V = \sqrt{0,1A} * A$$

$$A = \sqrt[3]{\frac{V^2}{0,1}} = \sqrt[3]{\frac{(4800 \text{ cm}^3)^2}{0,1}} = 613,05 \text{ cm}^2$$

$$h = \sqrt{0,1A} = \sqrt{0,1 * 613,05 \text{ cm}^2} = 7,83 \text{ cm}$$

ANEXO G CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

- **Costos de producción**

Costos administrativos por empaque: \$555.03

Costos de materia prima por empaque: \$33,557.5

Costo total de un empaque:

$$555,03 + 33.557,5 = \$34.112,53$$

Se producen 1000 unidades, por lo tanto el costo de producción total es de:

$$34.112,53 * 1000 = \$34.112.530$$

- **Ventas**

$$1000 \text{empaques} * \left(\frac{48.733,16}{1 \text{empaque}} \right) = \$48.733.160$$

- **Utilidad bruta**

$$R = \text{Ventas} - \text{Costos}$$

$$R = 48.733.160 - 34.112.530 = \$14.620.630$$

- **Utilidad neta**

$$P = R - eI - t(R - dI)$$

$$P = 14.620.630 - (0,1 * 52.198.800) - 0,5(14.620.630 - 0,1 * 52.198.800)$$

$$P = 4.700.375$$

- **Tasa de retorno**

$$ROI = \frac{P}{I} = \frac{4.700.375}{52.198.800} = 0,0900 = 9,0048\%$$

- **Tiempo de recuperación de capital**

$$TR = \frac{I}{P + eI}$$

$$TR = \frac{52.198.800}{4.700.375 + (0,1 * 52.198.800)} = 5,2618 \text{ años}$$