

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Evaluación del secado de pasta deslignificada y blanqueada de
celulosa de raquis de banano

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Ana Luisa Samayoa Menéndez para optar al grado académico de Licenciada
en Ingeniería Química Industrial

Guatemala
2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

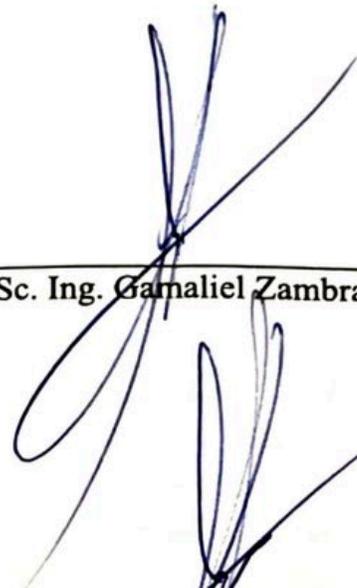


Evaluación del secado de pasta deslignificada y blanqueada de
celulosa de raquis de banano

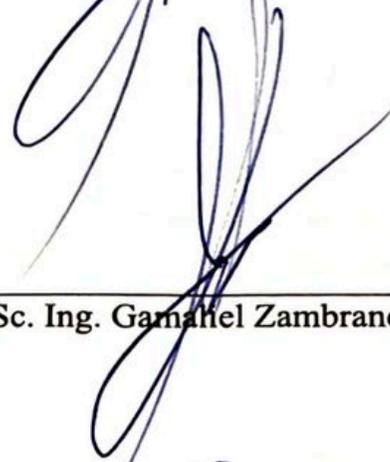
Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Ana Luisa Samayoa Menéndez para optar al grado académico de Licenciada
en Ingeniería Química Industrial

Guatemala
2021

Vo. Bo.:

(f) 
MSc. Ing. Gamaliel Zambrano

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
MSc. Ing. Luis Ernesto Nuñez

(f) 
MSc. Ing. María José Ramos

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de diciembre de 2021

PREFACIO

El presente trabajo de graduación se llevó a cabo por el interés que existe de brindar información a la industria guatemalteca teniendo como fin promover la economía circular, teniendo como materia prima desechos agrícolas dando lugar a la producción de sustitutos comerciales de embalaje. Con el presente se buscó realizar la investigación que permitiera proponer un proceso de laminado y secado para la obtención de nuevos productos. El período de estudio, experimentación y redacción duro desde junio 2020 hasta octubre 2021, realizando visitas de campo, mediciones en laboratorios especializados y los análisis correspondientes para los resultados obtenidos.

El desarrollo de este estudio no se podría haber realizado sin el apoyo de muchas personas e instituciones a lo largo del camino. En primer lugar, quiero agradecer a Dios por su guía en todo momento y permitirme llegar hasta donde estoy ahora. Agradezco el apoyo incondicional de mi familia, principalmente de mis padres, Arturo Samayoa y Maribel de Samayoa, así como de mis hermanos Héctor y Javier Samayoa, quienes han estado presentes en todo momento de mi vida. De igual forma quiero agradecer a mi novio Diego Bran, por el apoyo y motivación constante en todo momento. Además de agradecerles, quiero dedicarles mi trabajo, así como a mi abuelita, Virginia de Samayoa, quien me ha motivado a lo largo del camino.

Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala y al departamento de Ingeniería Química, por la formación profesional brindada, y permitirme desarrollar esta investigación.

Quiero agradecer el apoyo brindado por mi asesor MSc. Ing. Gamaliel Zambrano, que fue fundamental para el desarrollo del presente, contando con sus correcciones, comentarios y guía durante todo el proceso. Igualmente quiero agradecer al MSc. Ing. Luis Nuñez, quien también fue de mucho apoyo con sus correcciones y comentarios durante todo el desarrollo.

Asimismo, debo agradecer a muchos amigos que fueron parte importante en la realización del proyecto, que me dieron la motivación para continuar y terminar el trabajo: Lesly Zelada, Lai-Wah Serrano, Melisa Paredes, Melissa Cruz, Dayana Galicia y Grecia Córdova. De igual forma, mi más sincero agradecimiento a los técnicos del Laboratorio de Operaciones Unitarias: José, Chapo y Héctor, quienes siempre me ayudaron en todo momento.

Un especial agradecimiento a las empresas que me brindaron su apoyo, con la materia prima y para realizar el análisis de las muestras; ambas empresas son de gran prestigio a nivel nacional e internacional. También quiero agradecer al Laboratorio Global Quality S.A., que me ayudó con equipos para poder completar los análisis necesarios para obtener ciertos resultados.

Finalmente dedico mi trabajo a todas las personas mencionadas anteriormente, así como aquellos que ya no están conmigo físicamente, incluyendo a mis abuelitos, Gabino y Esperanza Menéndez, y César Samayoa, que, aunque no los puedo ver, se que fueron un apoyo incondicional en todo momento.

Agradezco a todos por creer en mí y por formar parte de una importante etapa de mi vida.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
RESUMEN.....	xviii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
A. GENERAL.....	3
B. ESPECÍFICOS.....	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. MARCO TEÓRICO	6
A. VARIEDADES Y CLASIFICACIÓN DEL BANANO	6
B. INDUSTRIA BANANERA EN GUATEMALA.....	6
C. FACTORES INFLUYENTES EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO EN EL PAÍS.....	6
D. PRINCIPALES RESIDUOS DEL CULTIVO DE BANANO	7
E. OPERACIONES UNITARIAS.....	7
F. PROCESO DE PRENSADO	8
G. PROCESO DE SECADO	8
1. Descripción del proceso general.....	8
2. Condiciones externas del proceso	10
3. Condiciones internas del proceso	10
4. Mecanismos existentes.....	11
5. Clasificación de las operaciones de secado	11
6. Secador de platos.....	12

7.	Velocidad de secado de equipos por lotes	13
8.	Carta psicrométrica	14
H.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTO.....	20
1.	Evaluación de color.....	20
2.	Número Kappa	23
3.	Humedad	23
4.	Adición de aditivos.....	24
V.	ANTECEDENTES	26
VI.	METODOLOGÍA.....	28
A.	OBSERVACIÓN.....	28
B.	DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LA PULPA A USAR	28
C.	PREPARACIÓN DE LÁMINAS	33
D.	PRENSADO DE LÁMINA	33
E.	SECADO	34
F.	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO.....	35
VII.	RESULTADOS	42
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
IX.	CONCLUSIONES.....	69
X.	RECOMENDACIONES.....	70
XI.	BIBLIOGRAFÍA	72
XII.	ANEXOS.....	75
A.	DATOS DE PLACA.....	75
B.	REACTIVOS QUÍMICOS	81
C.	DATOS ORIGINALES	82
D.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	86
G.	CURVAS DE SECADO A OTRAS CONDICIONES	91

H. FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO	106
XIII. GLOSARIO	119
XIV. ABREVIATURAS	122

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Espesor de la lámina desarrollada de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF, previo y posterior al proceso de laminado y secado	42
Cuadro 2. Espesor de la lámina desarrollada de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF, previo y posterior al proceso de laminado y secado	42
Cuadro 3. Caracterización de humedad base húmeda de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado.....	43
Cuadro 4. Caracterización de humedad base húmeda de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado.....	43
Cuadro 5. Caracterización de humedad base seca de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado	44
Cuadro 6. Caracterización de humedad base seca de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado	44
Cuadro 7. Densidad de la pulpa blanqueada por método ECF, antes y después del proceso de laminado y secado.....	45
Cuadro 8. Densidad de la pulpa blanqueada por método TCF, antes y después del proceso de laminado y secado.....	45
Cuadro 9. Caracterización de pH de la pulpa blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado.....	46
Cuadro 10. Caracterización de pH de la pulpa blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado.....	46
Cuadro 11. Caracterización de número Kappa de lámina realizada de pulpa blanqueada por método ECF, previo y posterior al proceso de secado.....	47
Cuadro 12. Caracterización de número Kappa de lámina realizada de pulpa blanqueada por método TCF, previo y posterior al proceso de secado.....	47
Cuadro 13. Caracterización de gramaje de lámina desarrollada de pulpa blanqueada por método ECF.....	48
Cuadro 14. Caracterización de gramaje de lámina desarrollada de pulpa blanqueada por método TCF.....	48
Cuadro 15. Resistencia a la compresión promedio de lámina desarrollada con pulpa blanqueada por método ECF	49
Cuadro 16. Resistencia a la compresión promedio de lámina desarrollada con pulpa blanqueada por método TCF	49
Cuadro 17. Caracterización de muestra prensada.....	50

Cuadro 18. Caracterización de lámina desarrollada	50
Cuadro 19. Caracterización de color de pulpa posterior al proceso de laminado y secado	51
Cuadro 20. Especificaciones de secadores propuestos a nivel industrial	61
Cuadro 21. Especificaciones de secador de bandejas	75
Cuadro 22. Especificaciones de prensa hidráulica	75
Cuadro 23. Especificaciones de balanza de humedad	76
Cuadro 24. Especificaciones de la balanza.....	76
Cuadro 25. Especificaciones de potenciómetro.....	77
Cuadro 26. Especificaciones de micrómetro digital.....	77
Cuadro 27. Especificaciones de espectrofotómetro.....	78
Cuadro 28. Especificaciones de indicador de temperatura.....	78
Cuadro 29. Especificaciones de Densitómetro	79
Cuadro 30. Especificaciones de balanza analítica	79
Cuadro 31. Especificaciones de higrómetro	80
Cuadro 32. Especificaciones de anemómetro.....	80
Cuadro 33. Especificaciones de ácido sulfúrico utilizado	81
Cuadro 34. Especificaciones de permanganato de potasio utilizado	81
Cuadro 35. Condiciones de operación durante la realización de la presente investigación.....	82
Cuadro 36. Propiedades de aire seco a la presión atmosférica	82
Cuadro 37. Medidas de marcos utilizados para el laminado de las muestras	82
Cuadro 38. Espesor de muestra deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por método ECF antes y después del proceso de secado	83
Cuadro 39. Espesor de muestra deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por método TCF antes y después del proceso de secado	83
Cuadro 40. Absorbancia de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF para Número Kappa, antes del proceso de secado	84
Cuadro 41. Absorbancia de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF para Número Kappa, antes del proceso de secado	84
Cuadro 42. Absorbancia de lámina seca, utilizando pulpa blanqueada por método ECF para Número Kappa	84
Cuadro 43. Absorbancia de lámina seca, utilizando pulpa blanqueada por método TCF para Número Kappa	85
Cuadro 44. Parámetros de color CIELAB de muestras analizadas.....	85

Cuadro 45. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF.....	88
Cuadro 46. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF.....	89
Cuadro 47. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF, prensada	89
Cuadro 48. Costo de producción de embalajes de huevos a partir de pulpa deslignificada.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de rapidez de secado para condiciones de secado constantes	10
Figura 2. Secador por lotes, de platos tradicional.....	13
Figura 3. Gráfica de humedad respecto al tiempo en secado por lotes.....	14
Figura 4. Líneas de temperatura de bulbo seco en carta psicrométrica	15
Figura 5. Líneas de temperatura de bulbo húmedo en carta psicrométrica.....	15
Figura 6. Líneas de temperatura de punto de rocío en carta psicrométrica	16
Figura 7. Líneas de humedad relativa en carta psicrométrica.....	16
Figura 8. Líneas de humedad absoluta en carta psicrométrica	17
Figura 9. Líneas de entalpía en carta psicrométrica	17
Figura 10. Líneas de volumen específico en carta psicrométrica	18
Figura 11. Carta psicrométrica a temperatura a 25°C y presión barométrica de 101.325 kPa (nivel del mar) con unidades de sistema internacional (SI)	19
Figura 12. Matriz de color en los atributos de color.....	20
Figura 13. Croma de color de atributos de color	21
Figura 14. Luminosidad de color según sistema tridimensional de atributo de color.....	21
Figura 15. Gráfica de color para escala CIELAB con los parámetros a* y b*	22
Figura 16. Gráfica de color en tres dimensiones con eje horizontal de claridad (L)	23
Figura 17. Barrido de onda en Espectofotómetro UV/VIS.....	32
Figura 18. Barrido de onda en Espectofotómetro UV/VIS.....	39
Figura 19. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF	52
Figura 20. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF	53
Figura 21. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 min y blanqueada por el método TCF	54
Figura 22. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF	55
Figura 23. Curva de humedad en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 min, blanqueada por el método ECF y prensada	56
Figura 24. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos, blanqueada por el método ECF y prensada	57

Figura 25. Balance de masa y energía instantáneo del proceso de secado por lotes.....	58
Figura 26. Balance de masa y energía del proceso total de secado por lotes.....	59
Figura 27. Diagrama de proceso de secado propuesto a nivel industrial.....	60
Figura 28. Curva de humedad en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 130 min y blanqueada por el método ECF	91
Figura 29. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 130 minutos y blanqueada por el método ECF	91
Figura 30. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 130 min y blanqueada por el método TCF	92
Figura 31. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 130 minutos y blanqueada por el método TCF	92
Figura 32. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 10% por 100 min y blanqueada por el método ECF	93
Figura 33. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 10% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF	93
Figura 34 . Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 10% por 100 min y blanqueada por el método TCF	94
Figura 35. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 10% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF	94
Figura 36. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	95
Figura 37. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	95
Figura 38. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	96
Figura 39. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	96
Figura 40. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	97
Figura 41. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	97
Figura 42. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	98
Figura 43. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	98
Figura 44. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C.....	99

Figura 45. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C	99
Figura 46. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	100
Figura 47. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	100
Figura 48. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	101
Figura 49. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	101
Figura 50. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	102
Figura 51. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C.....	102
Figura 52. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada.....	103
Figura 53. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada.....	103
Figura 54. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 100 °C.....	104
Figura 55. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada.....	104
Figura 56. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 120 °C.....	105
Figura 57. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 120 °C con muestra previamente prensada.....	105
Figura 58. Raquis de plantación de banano.....	106
Figura 59. Preparación de pulpa previo al laminado.....	106
Figura 60. Laminado de pulpa en marco pequeño.....	107
Figura 61. Prensa hidráulica del Laboratorio de Operaciones Unitarias utilizada para pulpa prensada antes al secado.....	107
Figura 62. Medición de muestra posterior al proceso de prensado.....	108
Figura 63. Secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias utilizado en la investigación...	108
Figura 64. Diagrama de secador de Laboratorio de Operaciones Unitarias	109
Figura 65. Lámina después del proceso de secado.....	110
Figura 66. Preparación de muestra para medición de pH.....	110
Figura 67. Medición de pH de muestra de lámina obtenida después del proceso de secado.....	111

Figura 68. Celdas de cuarzo utilizadas en el Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35.....	111
Figura 69. Celda de cuarzo con muestra para ser leída Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35 del laboratorio <i>Global Quality S.A.</i>	112
Figura 70. Porta celdas de Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35 del laboratorio Global Quality S.A.....	112
Figura 71. Pulpa para embalaje de huevos previo al proceso de secado	113
Figura 72. Embalaje para huevos creado a partir de 75% de pulpa celulósica de raquis de banano	113
Figura 73. Embalaje para huevos previo y posterior al proceso de secado, creado a partir de 15% de pulpa celulósica de raquis de banano	114
Figura 74. Secador de banda continuo GEM.....	114
Figura 75. Proceso de rodamiento de papel con maquinaria moderna	115
Figura 76. Proceso completo desde deslignificación de raquis de banano hasta obtención de lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF a escala laboratorio	116
Figura 77. Proceso completo desde deslignificación de raquis de banano hasta obtención de lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF a escala laboratorio	117
Figura 78. Certificación de Espectrofotómetro utilizado para la investigación.....	118

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Masa total de un sólido y su composición	23
Ecuación 2. Contenido de humedad de sólido en base seca	24
Ecuación 3. Contenido de humedad de sólido en base húmeda	24
Ecuación 4. Expresión de número Kappa a partir de absorbancia en espectrofotómetro	26
Ecuación 5. Conversión de humedad de sólido de base seca a base húmeda	27
Ecuación 6. Conversión de humedad de sólido de base húmeda a base seca	27
Ecuación 7. Conversión de ambas bases de humedad incluyendo la masa húmeda y seca del sólido	27
Ecuación 8. Obtención de densidad de pulpa deslignificada y blanqueada por el método gravimétrico	29
Ecuación 9. Obtención de densidad de lámina seca por el método gravimétrico	37
Ecuación 10. Porcentaje de humedad según método AOAC 925.10.....	37
Ecuación 11. Gramaje de muestra	40
Ecuación 12. Cálculo de Número Kappa.....	86
Ecuación 13. Cálculo de densidad según método gravimétrico	86
Ecuación 14. Cálculo de materia seca de lámina en curva de secado.....	86
Ecuación 15. Cálculo de humedad de lámina en la curva de secado	86
Ecuación 16. Cálculo de área superficial para flux de curva de secado	87
Ecuación 17. Cálculo de flux en proceso de secado.....	87
Ecuación 18. Balance de masa del proceso de proceso de secado.....	87
Ecuación 19. Balance de energía de proceso de secado	88
Ecuación 20. Propagación de error de área superficial.....	90
Ecuación 21. Propagación de humedad base seca en kg H ₂ O/kg sólido seco	90
Ecuación 22. Propagación de error de flux.....	90

RESUMEN

En los últimos años se han realizado investigaciones e implementaciones de productos más amigables con el ambiente, ya sea por sus procesos más eficientes u otros aspectos que ayuden a reducir el impacto ambiental, desde la materia prima hasta su producto final.

En este trabajo se estudiaron los procesos que la pulpa deslignificada y blanqueada requiere desde el laminado hasta el secado, incluyendo el análisis de la pulpa al inicio y al final de los procesos, para así proponer información que pueda permitir una aplicación comercial de esta materia prima. De igual forma, se realizaron los análisis correspondientes de balances de masa y energía, y las curvas de secado del proceso, para tener un estudio más detallado del sistema.

Para la parte experimental, se trabajaron con muestras de diferentes condiciones de deslignificado, variando la concentración de solución de hidróxido de sodio utilizada así como el tiempo de deslignificación. Por otro lado, también se trabajó con pulpa con diferentes tipos de blanqueo, siendo el método con cloro (ECF) y sin cloro (TCF). Estas muestras fueron laminadas o prensadas y posteriormente secadas a diferentes temperaturas para obtener los parámetros de secado. Las curvas analizadas fueron las de pérdida de humedad respecto al tiempo y la rapidez de secado de la muestra.

Con la investigación realizada se pudo determinar que la pérdida de humedad es significativa en el proceso de secado, siendo en promedio 82.94% m/m de pérdida según lo analizado en base húmeda, por otro lado según la base de cálculo de la muestra de ECF 100 min 8% NaOH, se tienen más de 13 kg de agua/kg masa seca, mostrando la alta cantidad de agua que se tiene al inicio del proceso de secado, esto mostrando la humedad en base seca.

De igual forma se pudo establecer que en el secador de bandejas con el que se trabajó, las láminas desarrolladas de espesor promedio de 2.971 ± 0.001 mm, requieren 180 minutos de secado, en un rango de temperatura de 110 °C a 130 °C para tener una humedad final entre 3% m/m y 10% m/m final. Se pudo concluir que es posible el desarrollo de una lámina a partir de la pulpa celulósica proveniente del raquis de banano y dependiendo la cantidad de pulpa agregada a la lámina se pueden obtener diferentes gramajes dependiendo la aplicación que se le desea dar.

I. INTRODUCCIÓN

La industria agrícola es el principal pilar de la economía de Guatemala, y el banano ha sido uno de los productos más importantes debido a que tiene un volumen alto de exportación. Este producto se ha posicionado como el principal generador de divisas en este sector y según proyecciones, se espera que se mantenga así, superando al café y al azúcar. En el país se cuentan con más de 60 mil hectáreas destinadas a la plantación de banano, siendo una actividad de cultivo anual. La empresa con la que se estuvo trabajando para realizar el presente proyecto cuenta con 2,200 hectáreas para el cultivo en el país. En la producción se generan residuos sólidos entre los cuales se encuentra el tallo del racimo, el cual es recolectado y esparcido en las orillas de las carreteras. Estos residuos agrícolas pueden ser aprovechados como materia prima para nuevos productos de aplicación comercial con un tratamiento adecuado.

Muchos de los residuos agrícolas no son aprovechados de manera adecuada, o si se llega a utilizar una cierta cantidad, el mismo se limita a la producción de compost y abono. El enfoque de este proyecto fue brindar información acerca de la transformación de estos residuos, especialmente el raquis de banano, y aprovecharlos para la producción de cartón, trabajando con una pasta previamente deslignificada y blanqueada, de forma que esta se pueda laminar, prensar y secar para obtener las características adecuadas para su comercialización. En este caso se trabajó con el raquis de la planta de banano, la cual es la parte que agarra las pencas del fruto y cuelga a partir del tronco madre. Este fue inicialmente deslignificado, lo que significa que la lignina fue removida de las fibras y así se permitió tener la mayoría de celulosa, que es la necesaria para fabricar el papel y el cartón. De igual forma, esto fue decisivo para seleccionar el raquis, debido a que es una de las partes que aparte de ser desechada es rica en celulosa.

Se debe considerar que la pulpa también fue blanqueada previamente al proceso de laminado, esto por diferentes métodos, siendo ECF (Elemental Chlorine Free) y TCF (Total Chlorine Free), para así obtener un producto de color más blanco. El proceso de secado se utilizó para obtener el producto final, ya que es necesario que la pulpa pase por esta operación para así tener la posible aplicación comercial. Con esta alternativa se pretendía el procesamiento y uso responsable de desechos agrícolas, permitiendo integrar este proceso a una futura economía circular, pues los desechos de la industria pueden ser utilizados como materia prima para la misma industria (cajas y empaques) o para otra.

Actualmente no se cuenta con gran parte de la información necesaria en el país para realizar el proceso de secado, laminado y prensado de la pulpa proveniente del raquis del banano, por lo que este proyecto corresponde a estos procesos especialmente al del secado, contando con las curvas características del proceso las cuales muestran las tendencias de humedad a lo largo del tiempo, la temperatura y la velocidad, así como otras propiedades fundamentales para el secado de la pulpa. Esta información es útil para promover la

economía circular en el país, permitiendo el uso de desechos agrícolas como materia prima para un producto que puede ser utilizado en diferentes tipos de embalajes o en otras aplicaciones comerciales. En este caso se probó la aplicación comercial con embalajes para huevos, teniendo éxito en su creación. Con este tipo de economía se busca tener una estrategia que permita crear flujos que replacen la economía y consumo lineal existente, al desechar cualquier elemento sin ser nuevamente explotado, y permitan dar una aplicación a desechos abundantes.

Es por esto que el presente trabajo cuenta con la experimentación y el análisis de las curvas de secado correspondientes a la pulpa deslignificada y blanqueada, así como un promedio de las mismas a las mismas condiciones. De igual forma, se tiene la variación de tiempos y temperaturas para la determinación de los parámetros adecuados para este trabajo. Por otro lado, se cuenta con la caracterización de la pulpa, así como del producto ya seco. Para mayor detalle de la teoría se puede leer el marco teórico, así como los antecedentes, para las curvas promedio y los resultados principales se puede acudir al apartado de resultados y para mayor detalle de las curvas de secado se pueden revisar los anexos.

II. OBJETIVOS

A. GENERAL

Evaluar el proceso de laminado, prensado y secado de pasta de celulosa deslignificada y blanqueada proveniente de residuos del raquis de la planta de banano para fabricación de papel o cartón.

B. ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la pulpa deslignificada y blanqueada a utilizar proveniente del raquis de banano, evaluando la densidad, humedad, y número Kappa, para comparar con las características finales.
2. Construir la curva de rapidez de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de la biomasa a las condiciones de operación determinadas, para establecer el tiempo requerido y el porcentaje perdido de humedad de la pasta.
3. Evaluar los equipos y el proceso de secado requerido, usando las características de la lámina prensada, fabricada con la pasta de celulosa deslignificada y blanqueada, para obtener una lámina final con el espesor y humedad requerida.
4. Caracterizar el producto seco obtenido, evaluando el pH, densidad, humedad, espesor y color para determinar la posible viabilidad en fabricación de papeles y cartones comerciales.

III. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo cuenta con el propósito de realizar un estudio inicial de un sustituto a la pulpa convencional usando residuos agrícolas, especialmente los provenientes de la planta de banano. Este trabajo busca ayudar a la falta de información que hay respecto a la utilización de estos residuos en el país. Se consideró que es una plantación abundante de Guatemala. Se estimó, según el Instituto Nacional de Estadística de Guatemala (INE), que en el año 2017 se tuvo una producción mayor a los 1.114 millones de toneladas métricas (24.5 millones de quintales) de banano, lo que representó una exportación aproximada de 1.091 millones. Esto da lugar a una disponibilidad de los residuos que se proponen como materia prima, para la producción del producto propuesto.

Guatemala es el segundo país con mayor productividad en Latinoamérica en este cultivo, produciendo 3,800 cajas por hectárea, y cada caja tiene 102 dedos. Cada hectárea de plantación cuenta con un rango de plantas sembradas que oscila entre 1,000 y 1,500, y por cada una de ellas se produce aproximadamente un 20 % de desecho. Este, aunque se aprovecha para los suelos de la misma plantación, puede ser utilizado para este nuevo producto.

Para este estudio se propuso el laminado, prensado y secado de una pasta de celulosa previamente deslignificada y blanqueada, proveniente del raquis del banano, de manera que se obtuviera un nuevo producto que pueda ser comercializado a partir de residuos agrícolas. Se pretendía el aprovechamiento de estos residuos, pues como se menciona anteriormente, es uno de los cultivos más importantes y vastos del país.

La importancia del secado radica en establecer una nueva aplicación para estos residuos, ya que, aunque pueden ser utilizados en los suelos de las mismas plantaciones, estos pueden causar problemas de carácter ambiental, debido a que no son tratados adecuadamente porque se genera metano en su descomposición. Fue de gran interés darle un valor agregado a nuevos productos que son creados a partir de desechos, permitiendo contribuir no solo a una industria, siendo la agrícola, sino también a demás industrias que permitan tener una aplicación a partir del producto obtenido. Es fundamental esta parte del proceso, por la necesidad que el producto tenga cierta consistencia y esté seco para que pueda ser utilizado ya sea en material de empaque o en otros materiales para embalaje. Con esto se puede aportar información a empresas guatemaltecas para que se tenga el consumo de este tipo de productos de forma que se promueva la economía circular, permitiendo que los desechos agrícolas tengan una aplicación que permita el ingreso económico. De esta forma se propone que la industria bananera venda sus desechos, generando un nuevo ingreso y teniendo un mejor descarte de sus desechos y que las industrias interesadas puedan hacer un nuevo producto a partir de este, permitiendo cumplir con su calidad establecida y dando valor agregado por su origen. Asimismo, el estudio buscó determinar los parámetros correspondientes para tener un mejor desarrollo de las láminas, controlando las

variables principales como temperatura y tiempo de secado, siendo fundamentales para tener un producto con la resistencia y características deseadas.

Actualmente, el papel se fabrica a partir de celulosa que puede venir directamente de madera y que es utilizada por primera vez, o de un proceso de reciclaje. Si es la primera vez que entra al proceso se denomina como fibra virgen, y si se trata de fibra proveniente de reciclado, se le conoce como fibra reciclada, y está puede provenir de diferentes puntos de su ciclo de vida. El cartón, por otra parte, puede ser fabricado a partir de papel, que nuevamente puede tener fibras vírgenes o recicladas, y también se puede hacer por una mezcla de fibras que puede incluir cartón desechado.

IV. MARCO TEÓRICO

A. VARIEDADES Y CLASIFICACIÓN DEL BANANO

Debido a que a lo largo de la historia se ha tenido intercambio de material vegetal debido a las migraciones y mutaciones vegetales. Con estas mutaciones vegetales se ha tenido una diversidad genética en el banano. Este cultivo es originario del suroeste de Asia, y se ha difundido principalmente a Centro y Suramérica. La mayoría de estos cultivos son pertenecientes a la familia Musaceae. En los países que tienen un clima tropical se tiene una producción semiintensiva, lo que permite mantener la diversidad de las plantas, generando ingresos (Hoyos, y otros, 2012).

B. INDUSTRIA BANANERA EN GUATEMALA

Según el Diario de Centroamérica (2019), Guatemala se ha convertido en el tercer exportador de banano, detrás de Ecuador y Filipinas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación (FAO), en 2018 se suministró el 13% de la demanda de este producto. El crecimiento de la exportación se ha dado desde los años 70 y 80, comenzando con un incremento anual de 1%, hasta la década de los 90 en la cual este crecimiento se aceleró hasta alcanzar un alza de 5% anual según la Asociación de Productores Independientes de Banano (APIB) (Jiguan, 2019).

En cuanto a la producción, se implementaron medidas que ayuden a reducir la merma de este producto, para así aprovechar de mejor manera los cultivos y el empaque del banano. El programa implementado fue “Más cajas, menos rechazo” el cual se basa en capacitaciones constantes a los agricultores en temas desde la cosecha hasta el empaque del banano. Según la APIB, es un concepto que representa un incentivo para las industrias, pues implica tener mayores ingresos empacando más cantidad de producto (Jiguan, 2019).

C. FACTORES INFLUYENTES EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO EN EL PAÍS

El cultivo de banano requiere temperaturas relativamente elevadas, las cuales pueden variar de $21^{\circ} C$ a $29.5^{\circ} C$, por lo que el clima tropical del país favorece su cultivo. Es una planta que puede crecer entre los 0 y 1,000 metros sobre el nivel del mar, considerando el principio e mayor altura, menor temperatura. Tras varias evaluaciones, se ha determinado que el nivel adecuado de su plantación es entre 0 y 300 metros sobre el nivel del mar, mejorando así su calidad de producto y favoreciendo a su exportación. La latitud en la que se puede cultivar va entre los 0 y 30 grados norte y los 15 grados sur (Jiménez, 2014).

Es importante mantener un control adecuado en los factores hídricos de la plantación, para conservar un buen riego en caso sea necesario por deficiencias de agua. De igual manera, se deben contemplar las bordas y los drenajes para evitar inundaciones que afecten la plantación (Jiménez, 2014).

D. PRINCIPALES RESIDUOS DEL CULTIVO DE BANANO

Los residuos de la industria bananera son residuos vegetales, pues en esta planta lo único que se aprovecha es el fruto como tal. El pinzote de la planta se desecha en grandes cantidades, pues es la parte de la planta que sostiene al fruto. Esta es una parte de la planta que cuenta con características adecuadas para la producción de banano, pues es la parte con la mejor densidad en su fibra de la planta, lo que permite la obtención de celulosa que se puede usar en la producción de papel o cartón. De igual manera, el resto de la planta se puede utilizar para la extracción de fibras para contribuir a la elaboración de papel (Ludwig, 2019).

En general, los residuos del cultivo de banano se componen de un 10 % de lignina aproximadamente, y un 61 % de celulosa. Este primer compuesto es un biopolímero difícil de degradar, por lo que se busca quitarlo por medio de la deslignificación; para así permitir trabajar con la celulosa. Actualmente, el uso del pinzote no se utiliza para actividades económicas, lo que permite que sea utilizada y viable para la producción de papel o cartón. Cabe resaltar, el proceso de obtención de celulosa de residuos de esta planta es similar a la obtención de la celulosa de fibras maderables, lo que favorece al proceso (Ludwig, 2019).

Actualmente, no se tiene una calificación de los desechos en la empresa con la que se trabajó, aunque se utiliza el agua del raquis para el riego de los suelos, principalmente los arenosos, pues estos necesitan mayor tratamiento para cumplir con la calidad de tierra para el cultivo, y de esta forma se aprovecha su abono. Dependiendo de la época, y siguiendo la curva del clima, se produce la cantidad correspondiente de desechos, pero entre las semanas 20 a 42, la cantidad de estos es la mayor.

Cada período de cosecha en la empresa con la que se trabajó tiene una duración de 84 días, y se utilizan los desechos como abono natural, pero se necesita un período de descomposición de seis semanas, proceso que puede ocasionar contaminación a las plantaciones. Actualmente se tritura el raquis de la planta para obtener el jugo o “agua” (término usado en la industria) como se menciona anteriormente, y de cada uno se obtiene un litro para riego.

E. OPERACIONES UNITARIAS

Las operaciones unitarias son los pasos elementales de los procesos que forman parte de la ingeniería química. Estas pueden ser aplicadas a procesos químicos o físicos, y aunque estas se basan en la ingeniería pueden, también llevar la base de la ciencia y experiencia. Entre los principios fundamentales de estas se

encuentran: la conservación de masa y energía, los equilibrios físicos, propiedades de la materia, entre otros (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

F. PROCESO DE PRENSADO

El proceso de prensado se utiliza para entregar una gran cantidad de energía de forma controlada sobre un área determinada. Se le ejerce una cantidad de presión a un material que permite modificar ciertas características de los mismos. Para el proceso de elaboración de papel, esta etapa se utiliza para influir en la rigidez, el volumen, la resistencia y la rugosidad del producto (GABP Ingeniería, 2016).

Entre los equipos que existen para realizar este proceso se tienen:

- Prensas mecánicas: estas tienen un motor eléctrico que permite girar un volante por la inercia para acumular energía de forma que esta se entrega por un acoplamiento. Estas suelen utilizarse para trabajos de corte o estampación, entre otros (GABP Ingeniería, 2016).
- Prensas hidráulicas: estas se basan en el principio de Pascal, de forma que se alimentan de un pistón de gran diámetro con un fluido a alta presión para obtener altas fuerzas. En este caso, la entrega de energía se controla por la fuerza y la velocidad que se tienen. Suelen ser utilizadas para embutición profunda, acuñado, entre otros (GABP Ingeniería, 2016).

G. PROCESO DE SECADO

1. Descripción del proceso general

El proceso de secado se define como la eliminación de sustancias volátiles (humedad) para dar lugar a la producción de un producto sólido y seco. Al momento que un sólido húmedo se somete a un proceso de secado existe la transferencia de energía que normalmente se da en forma de calor por parte de los alrededores para evaporar el líquido en el sólido; y se da la transferencia de masa, siendo la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido (Cabrera, 2017).

La velocidad de este proceso se determina por la velocidad de los dos aspectos mencionados previamente. La transferencia de calor se puede dar como resultado de convección, conducción y/o radiación (Cabrera, 2017).

Este es uno de los últimos procesos de una línea, pues si la materia prima se encuentra muy húmeda, esta debe pasar por operaciones previas que puedan remover dicha humedad de manera que la operación de secado sea viable. Si la cantidad de líquido original es muy elevada, este se elimina en la mayor parte con métodos mecánicos. Como se menciona anteriormente, el objetivo de esta operación es disminuir la fase líquida del sólido, por lo que se trata de transferencia de masa, pero aún así también se ve afectada la transferencia de

calor. Esto último se debe a que existe un gradiente de temperatura, pues esta se aumenta para volatilizar el líquido y facilitar que este sea removido.

Muchas variables suelen influir en el proceso de secado, entre las cuales se pueden encontrar la geometría del sólido, siendo esta fundamental, ya que es la que determina el área de contacto con el medio que está secando. Por otro lado, también es importante conocer la temperatura y la humedad que se tiene en el equipo de secado, pues se necesita que este no esté muy húmedo para tener un mejor resultado. Por último, también se debe considerar la velocidad del equipo, pues esta puede ser variada según los ventiladores si se tiene ventilación forzada.

En cuanto el gas que se utiliza para secar este puede ser variado según las necesidades del sistema, de la materia prima y el producto. El más común a utilizar es el aire, pues en la bibliografía el sistema más conocido es agua-aire. Para estos sistemas se puede utilizar una carta psicrométrica, con la cual se pueden evaluar las diferentes características de dicho proceso, como lo son: humedad absoluta del aire, humedad relativa, temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, siendo esta última la temperatura del termómetro que tiene un algodón mojado en el bulbo.

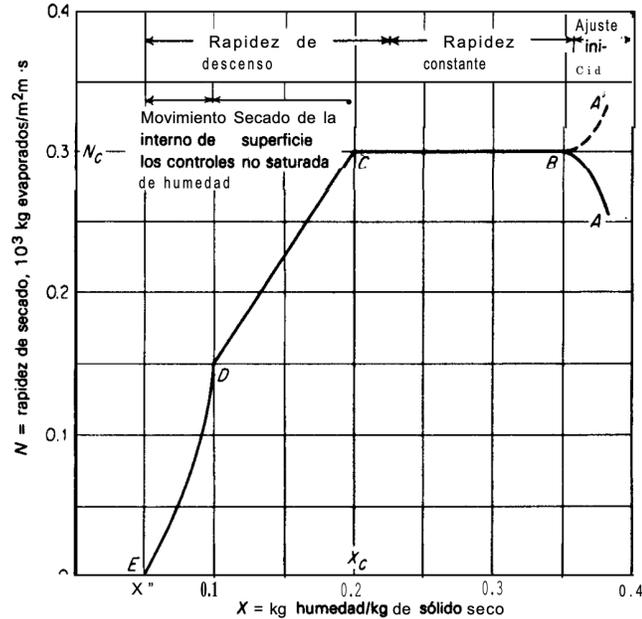
La curva de secado de un proceso se refiere a la cantidad de humedad que se tiene en base seca, siendo en función del tiempo. Es decir, que esta no es una gráfica lineal, pues se representan las diferentes etapas del secado, en las cuales se muestra la evolución de las propiedades del sólido conforme el tiempo o conforme el contenido de humedad del sólido. Al inicio del proceso esta curva comienza a descender hasta llegar a una tendencia lineal y nuevamente comienza a descender para tener un comportamiento asintótico hasta que llega a tener un valor casi constante. Este valor se conoce como humedad de equilibrio y con esto se demuestra que el sólido no tendrá una remoción total de humedad, siempre quedará con un cierto porcentaje que no será eliminado y dependerá su aceptación del producto y las normas que se buscan cumplir.

Dentro de las etapas de secado, es en la primera la que es más corta y tiene una menor evaporación que muchas veces puede ser considerada como no significativa, pues en esta etapa en la que el sólido se calienta de la temperatura ambiente a la temperatura de bulbo húmedo del aire en el equipo de secado. La siguiente etapa es en la que el sólido ya se encuentra en el rango de temperatura establecido y en este caso la velocidad de secado es constante. Es en esta etapa en la que la humedad no ligada al sólido es evaporada y la temperatura del aire en el equipo se mantiene igual a la del sólido. Por último, se tiene la etapa en la que la velocidad de secado disminuye y es en la que la humedad ligada es evaporada, por lo que la resistencia de evaporación es mayor, formando la línea de comportamiento asintótico como se menciona anteriormente.

En la última etapa de secado puede ser necesario incrementar la temperatura del equipo, pues para evaporar la humedad ligada se debe romper el equilibrio térmico que ya existe. Asimismo, en esta etapa el sólido ya

tiene una mayor temperatura a la de bulbo húmedo del aire o gas tratante. La transferencia de masa en este caso se realiza por difusión (Barrientos, 2013).

Figura 1. Curva de rapidez de secado para condiciones de secado constantes



Fuente. Treybal & Rodríguez (1980)

Nota. En esta gráfica presentada por Treybal y Rodríguez, se pueden observar las etapas de la rapidez de secado, teniendo el contenido de humedad como función del tiempo, siendo utilizada para determinar el tiempo de secado de la misma sustancia a las mismas condiciones, pero con mayores lotes.

2. Condiciones externas del proceso

Las condiciones externas que pueden afectar este proceso son principalmente: la temperatura, la humedad, el flujo de aire y presión. Estos aspectos deben ser tomando en cuenta al inicio del proceso de secado ya que es cuando se empieza a remover la humedad del sólido tratado. Se debe tener un control con los materiales que pueden tener al encogimiento, pues estos pueden tener deformaciones por el sobresecado y las altas tensiones que se llegan a tener dentro del material (Cabrera, 2017).

3. Condiciones internas del proceso

Entre los principales aspectos a considerar durante este proceso, es el movimiento que tiene la humedad dentro del sólido, pues este depende de la naturaleza física del mismo, la temperatura y su cantidad de

humedad. Cualquiera de los aspectos mencionados anteriormente puede determinar la velocidad de secado que se va a obtener.

Se obtiene un gradiente de temperatura en el sólido, conforme este tiene una transferencia de calor hacia su superficie húmeda. La evaporación comienza con la migración de la humedad del interior de sólido hacia su superficie, para que esta con el contacto al aire se evapore del sólido. Para que la humedad se mueva del interior de la pieza hacia su superficie se puede tener un mecanismo de difusividad, flujo capilar o presión interna (Cabrera, 2017).

4. Mecanismos existentes

Para la remoción de la humedad del producto se pueden tener los siguientes mecanismos:

- Evaporación: la cual se da cuando la presión de vapor de la superficie del sólido tiene el mismo valor que la presión atmosférica. Esto se da por el aumento que se tiene en la temperatura hasta llegar al punto de ebullición.
- Vaporización: este se lleva a cabo por convección, y es cuando se pasa aire caliente sobre el producto que está siendo evaluado, para que la humedad sea transferida al aire, de manera que este se enfría. En este caso, la presión de vapor que se tiene de la humedad sobre el sólido es menor a la atmosférica (Cabrera, 2017).

Cuando se trata de un sólido húmedo, como en tela o papel, se seca por el mecanismo de evaporación, pues se usa una corriente de gas para acarrear el vapor. La solución se puede esparcir para provocar la evaporación del líquido.

5. Clasificación de las operaciones de secado

Por otro lado, las operaciones de secado pueden ser clasificadas como por lotes. O continuas, y esta clasificación se puede dar desde el punto de vista de la sustancia que se está secando. La operación que se da de forma por lotes, suele ser una operación en realidad por semilotes, ya que, una cantidad de la sustancia se va a secar por la corriente de aire o gas que está en constante flujo en el equipo, pues es el encargado de remover la humedad. Mientras que en las operaciones continuas, ambos pasan de forma continua por el equipo, es decir no sólo el gas o aire utilizado para secar, sino también el elemento o sustancia que está siendo secada. Se debe realzar que en cualquiera de estas operaciones, el gas está en contante contacto con la sustancia que se está secando.

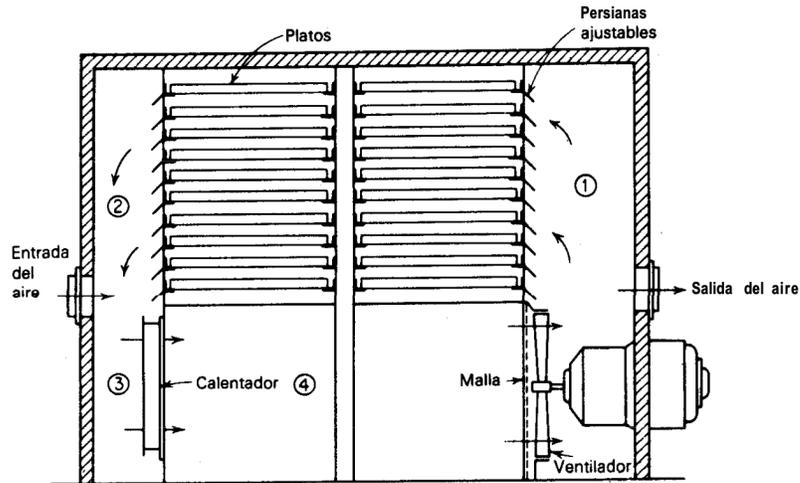
Los equipos y el proceso de secado pueden ser clasificados de las siguientes maneras, según las necesidades a cubrir o los parámetros establecidos:

- Por el método de operación: en este caso se puede clasificar como “por lotes” o continuo. El primero de estos trabaja de forma intermitente, y en condiciones de estado no estacionario, es decir que el elemento o la sustancia a secar es cargada al equipo y permanece en él hasta que esta esté seca o a la humedad requerida, y posteriormente se carga un nuevo lote. Por otro lado, los continuos, trabajan en un estado estacionario.
- Por el método en el que el calor necesario es obtenido para la evaporación de la humedad: en este caso los equipos pueden ser clasificados como directos o indirectos. Los secadores directos son aquellos en el que el calor es obtenido en su totalidad por el contacto directo que existe entre la sustancia con el gas o aire caliente, dando lugar así a la evaporación. Y por otro lado, los secadores indirectos, son aquellos que obtienen el calor independientemente del aire o gas que acarrea la humedad removida, como lo es la conducción utilizando una pared metálica que está en contacto con la sustancia. Asimismo, otro ejemplo de un método indirecto es la radiación o el calentamiento dieléctrico, el cual funciona cuando se genera calor utilizando un campo eléctrico con una alta frecuencia, dentro del sólido a trabajar.
- Por la naturaleza de la sustancia que va a ser secada: esto se debe a que la sustancia puede ser desde un sólido rígido, como un material flexible o granular e incluso una solución. Este es de los aspectos más importantes a considerar, pues la forma física y los manejos necesarios tienen la mayor influencia en la selección del equipo a utilizar (Treybal & Rodríguez, 1980).

6. Secador de platos

Este es un equipo que pertenece a la clasificación de secadores por lotes, generalmente este tipo de operación tiene un mayor costo, por lo que suele ser limitada a plantas piloto, a pequeña escala, trabajos de investigación o para materiales que tienen un gran valor, que no afecte tanto la operación en el costo del proceso. De igual forma, este puede ser clasificado como un secador directo, y suelen ser utilizados para sólidos que necesitan ser sujetados sobre platos. Este equipo también puede ser conocido como secador de gabinete, de compartimiento o de anaqueles, y consta de un gabinete el cual es cerrado cuando el secador ya es cargado, y se comienza el flujo de aire calentado a través de los platos y entre ellos para empezar a evaporar la humedad, siendo secado por la circulación cruzada. Cuando se alcanza la humedad deseada, el gabinete es abierto y el lote que está siendo trabajado es sustituido por uno nuevo.

Figura 2. Secador por lotes, de platos tradicional



Fuente. Treybal & Rodríguez (1980)

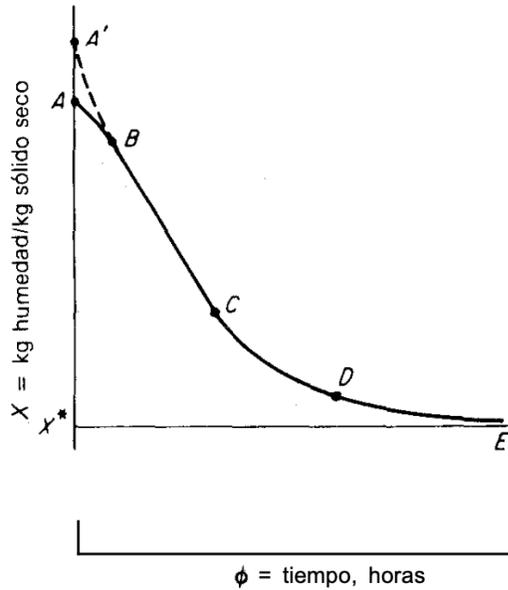
Nota: en este diagrama se pueden ver las direcciones de aire o gas que se tiene en el equipo, siendo el que se mueve por el gabinete para extraer la humedad de la sustancia que está siendo secada en el lote correspondiente.

7. Velocidad de secado de equipos por lotes

Se necesita conocer el tiempo de secado de una sustancia para poder determinar los horarios necesarios y el tamaño del equipo requerido. De igual forma, se deben evaluar otros parámetros para analizar su efecto en el tiempo de secado de la sustancia. Para determinar la velocidad en estos equipos, se puede suspender el sólido en el gabinete, teniendo el flujo de aire y así realizar un balance, de forma que el peso de la muestra seca se va midiendo en función del tiempo.

En este caso es importante considerar que la muestra a evaluar tenga un tamaño considerable, pues esta no debe ser muy pequeña y de ser posible es necesario que la muestra tenga diferentes espesores para así evaluar la variación según esta variable. Se deben establecer los parámetros de temperatura, humedad y velocidad constantes pues estos son los que determinan las condiciones contantes de secado.

Figura 3. Gráfica de humedad respecto al tiempo en secado por lotes



Fuente. Treybal & Rodríguez (1980)

Nota. En este caso se tiene la gráfica de humedad respecto al tiempo de una operación de secado por lotes, teniendo sus condiciones de secado constantes.

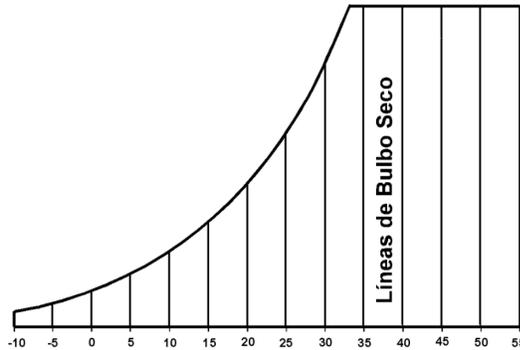
8. Carta psicrométrica

Es importante medir la cantidad de humedad del aire involucrando las propiedades termodinámicas del mismo y el efecto que tiene esta en material, por lo que se debe considerar las propiedades termodinámicas en los procesos donde aire húmedo es involucrado. Este tipo de aire mencionado es una mezcla de aire seco y vapor de agua, siendo dependiente de la temperatura y la presión. Se conoce como saturación al estado de equilibrio entre el aire húmedo y la fase de condensación de agua.

Las propiedades que deben ser evaluadas pueden ser analizadas de manera gráfica por una carta psicrométrica. Esta cuenta con diferentes parámetros que deben ser considerados, los cuales son:

- Temperatura de bulbo seco: esta es la temperatura que se tiene de un termómetro convencional, siendo el eje horizontal de la carta.

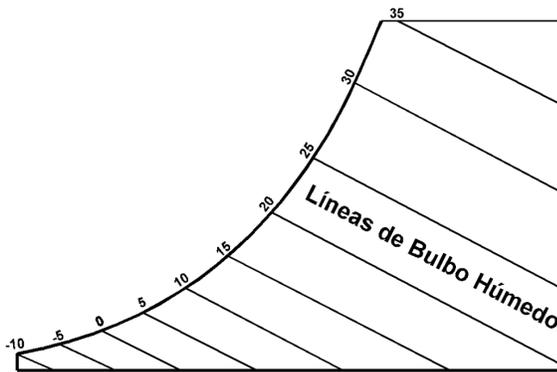
Figura 4. Líneas de temperatura de bulbo seco en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- Temperatura de bulbo húmedo: esta se determina con un termómetro de bulbo húmedo, siendo la temperatura resultante de evaporar el agua que cubre el termómetro ordinario. Esta siempre es menor que la temperatura de bulbo seco, pues la evaporación del agua tiene un efecto de enfriamiento. Mide el grado de humedad, y es la temperatura de evaporación de una muestra de aire. La escala de este parámetro se encuentra en el lado superior izquierdo de la carta, y sus líneas corren de forma diagonal de izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo, teniendo un ángulo de 30° respecto a la horizontal.

Figura 5. Líneas de temperatura de bulbo húmedo en carta psicrométrica

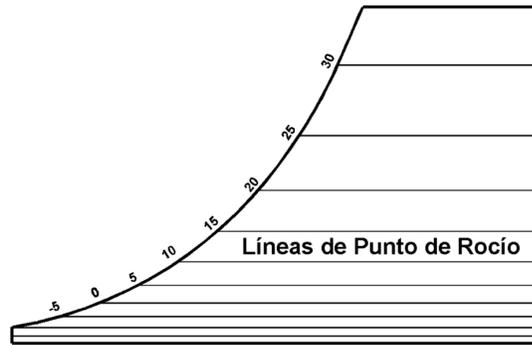


Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- Temperatura de punto de rocío: esta es la temperatura a la cual se condensa la humedad sobre la superficie, la escala de esta es idéntica a la de temperatura de bulbo húmedo, sin

embargo, las líneas de esta son horizontales y van de izquierda a derecha, no son en diagonal.

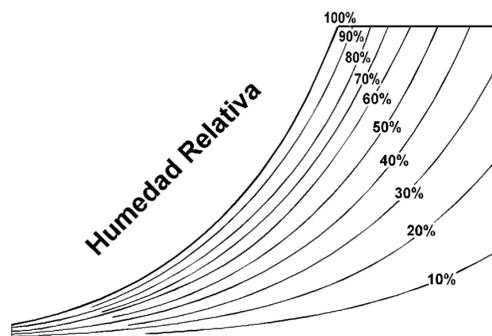
Figura 6. Líneas de temperatura de punto de rocío en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- **Humedad relativa:** esta es expresada en porcentaje, y es la relación que existe entre la presión parcial del vapor de agua y la presión del vapor en equilibrio del agua a cierta temperatura, dependiendo así de la presión y temperatura. Las líneas de este parámetro en la carta psicrométrica son curvas que van desde abajo y la izquierda, hasta arriba y la derecha. La curva de 100% de humedad relativa es la curva del borde izquierdo de la carta, pues es la única condición en la que la temperatura de bulbo húmedo y de punto de rocío son iguales, significando que se encuentra en saturación. El valor de este parámetro disminuye conforme se aleja de la curva de saturación, más hacia abajo y hacia la derecha.

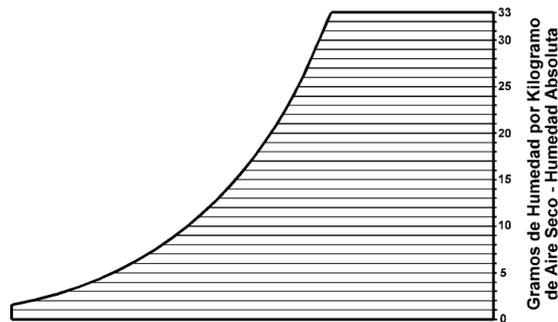
Figura 7. Líneas de humedad relativa en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- Humedad absoluta: esta es el peso real del vapor de agua en el aire, y se expresa en el sistema internacional como gramos de humedad por kilogramo de aire seco (g/kg), mientras que en el sistema inglés se expresa como gramos de humedad por libra de aire seco (g/lb). Esta también puede ser conocida como humedad específica, y sus líneas en la carta psicrométrica corren de derecha a izquierda de forma horizontal, y su escala se encuentra del lado derecho.

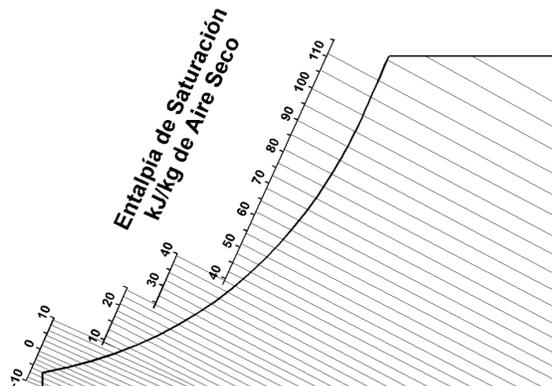
Figura 8. Líneas de humedad absoluta en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- Entalpía: esta es el flujo que se tiene de energía térmica en los procesos químicos que se llevan a cabo a presión constante, siendo la energía que el sistema intercambia con sus alrededores. Las líneas de este parámetro constante son inclinadas, siendo extensiones de las líneas de bulbo húmedo, debido a que el calor total del aire depende esta temperatura. Las unidades son de kilojulio por kilogramo de aire seco (kJ/kg) en el sistema internacional, mientras que en el sistema inglés se usan BTU/lb de aire seco. La escala aumenta de -6 kJ/kg a 115 kJ/kg, variando de -10 °C a 33 °C.

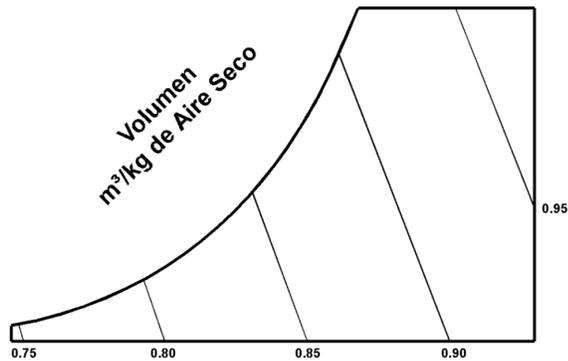
Figura 9. Líneas de entalpía en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

- Volumen específico: este es el volumen que ocupa una unidad de masa del material, siendo el inverso de la densidad, por lo que es una propiedad que no depende de la cantidad de materia. Las líneas de este van en un ángulo de 60° respecto a la horizontal, y su valor aumenta conforme va de izquierda a derecha. Las unidades que se utilizan en este caso son m^3/kg de aire.

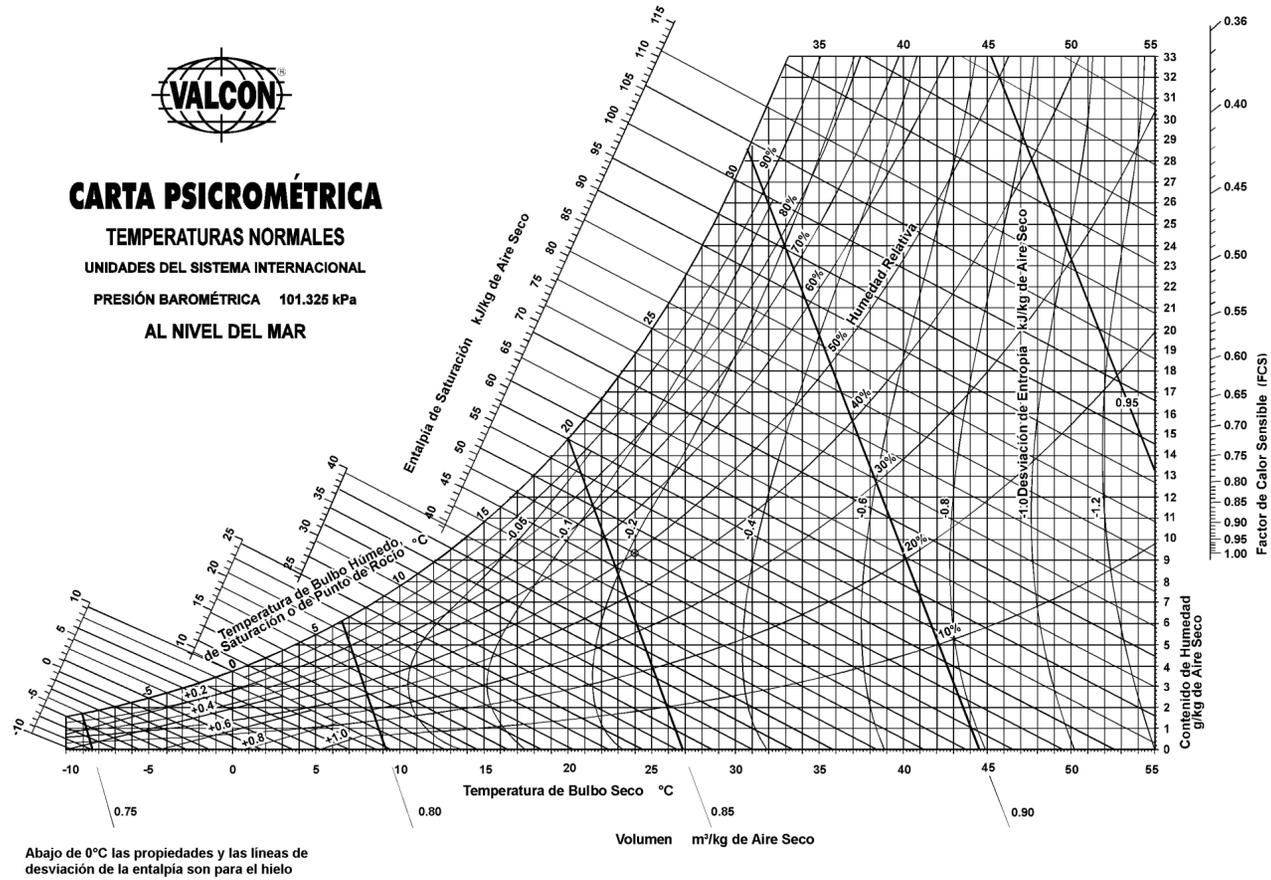
Figura 10. Líneas de volumen específico en carta psicrométrica



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

La carta psicrométrica se compone de todas las líneas mencionadas anteriormente, con sus respectivos parámetros, teniendo como resultado una gráfica con líneas entrecruzadas que permiten trazar puntos para así determinar las características buscadas a partir de las que se tienen. A partir de los puntos que pueden ser identificados, se puede mover a lo largo de las líneas correspondientes y así poder conocer las propiedades del aire trabajado.

Figura 11. Carta psicrométrica a temperatura a 25°C y presión barométrica de 101.325 kPa (nivel del mar) con unidades de sistema internacional (SI)



Fuente. Emerson Climate Technologies (2009)

H. CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTO

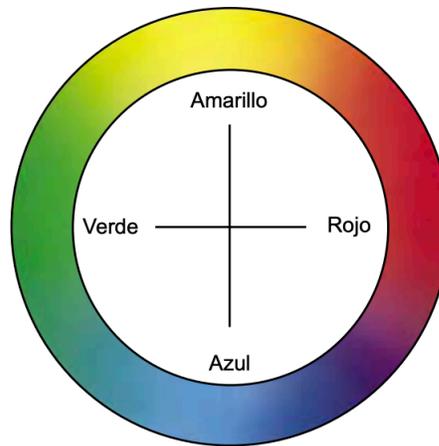
Para determinar si la materia prima o el producto terminado cumple según las especificaciones del mercado actual, es importante realizar diferentes análisis que permitan la evaluación de estos.

1. Evaluación de color

Para comunicar un color de manera objetiva se debe utilizar un instrumento de medición que permita identificar el color, distinguiéndolo de los demás por medio de un valor numérico. Se utiliza un equipo de espectrofotometría para la determinación del valor, y estas medidas pueden ser utilizadas en diversas áreas como lo pueden ser: pruebas de color de tintas, pruebas de color de pinturas, control de colores impresos en diferentes superficies y estandarización de logotipos, entre otros.

Cada color se puede distinguir por su matriz, valor y croma. Si se utilizan estos tres elementos para describir un color, este puede llegar a ser identificado de forma precisa, permitiendo que sea distinguido de los demás. La matriz del color es lo primero que normalmente es identificado, ya que es como se percibe el color, por ejemplo: amarillo, verde, rojo, y demás.

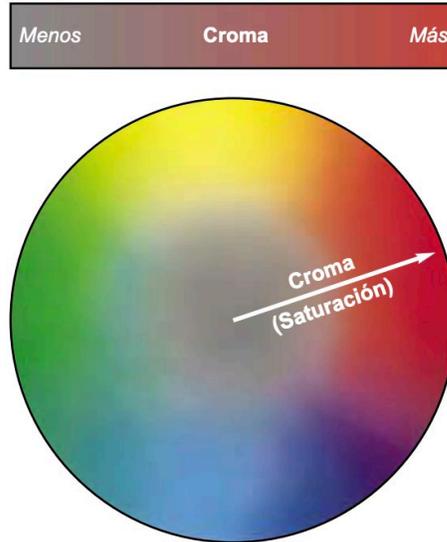
Figura 12. Matriz de color en los atributos de color



Fuente. X-Rite (2002)

Por otro lado, se debe considerar la croma del color, la cual es que tan llamativo o apagado es el color, es decir que tan intenso es el mismo o que tan pegado al gris es. Los colores que están en el centro son grises, siendo estos más apagados, y conforme se va moviendo a los extremos, se tiene un color más saturado, es decir con una mayor intensidad. A la croma también se le conoce como saturación de color.

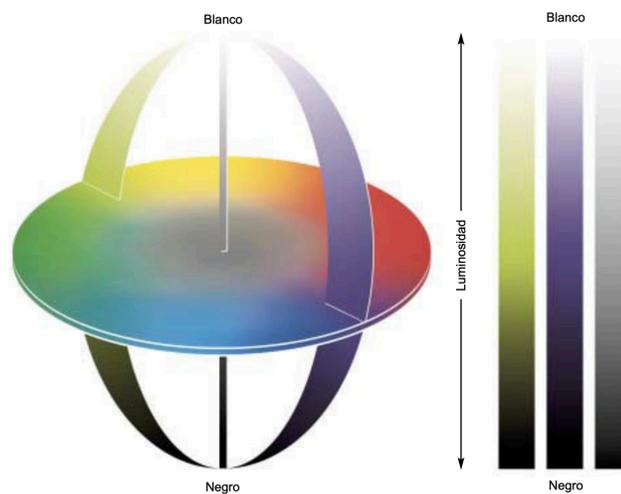
Figura 13. Croma de color de atributos de color



Fuente. X-Rite (2002)

Otro atributo que debe ser evaluado es la luminosidad del color, siendo este el grado de claridad que se tiene. Los colores pueden ser clasificados su claridad como tenues u oscuros. Este se utiliza para establecer sobre el aspecto luminoso, estableciendo que entre más oscuro es el color, tiene una luminosidad más baja o débil.

Figura 14. Luminosidad de color según sistema tridimensional de atributo de color

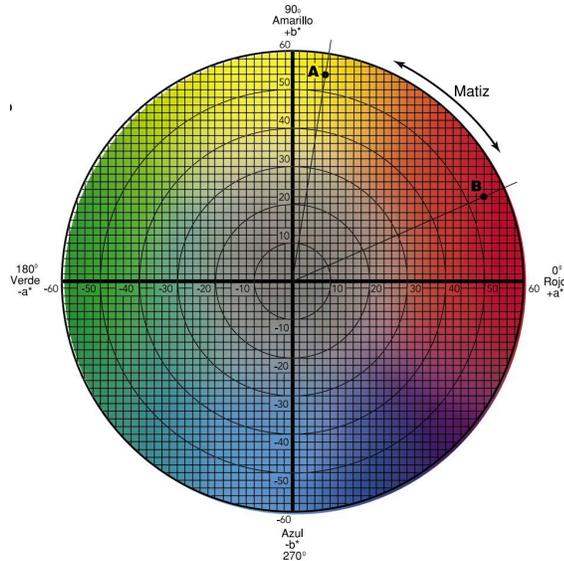


Fuente. X-Rite (2002)

Existen diferentes escalas de medición de color, entre las cuales se encuentran la escala Munsell y los sistemas de color CIE. Esta primera escala se basa en la percepción humana y asigna valores a la matriz, valor y croma del color. Por otro lado, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE – Comisión Internacional de la Iluminación) siendo la institución responsable de la fotometría y colorimetría, estandarizó el orden de color con la especificación de la fuente de la luz o iluminantes. Para este sistema se necesitan tres coordenadas y así poder identificarlo en el espacio de color. Entre las escalas de esta comisión, se encuentra la escala CIELAB, la cual se basa que los colores opuestos no pueden ser al mismo tiempo. Es por esto por lo que los resultados establecen valores de atributos rojo/verde y amarillo/azul.

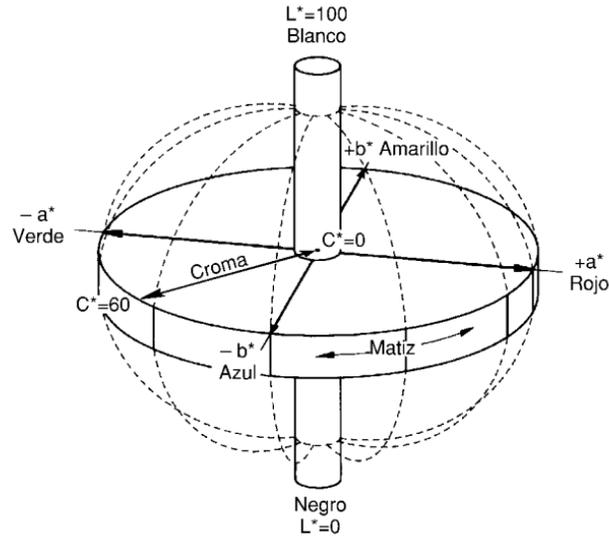
Cuando se trabaja con la escala CIELAB ($L^*a^*b^*$), la L^* se define como la claridad, la a^* es el valor de rojo/verde y la b^* es el calor amarillo/azul. Como se presenta en la siguiente figura se puede ver que el valor positivo de a^* es un desplazamiento a rojo, mientras que un valor negativo es un desplazamiento hacia verde. De igual forma, el valor positivo de b^* se tiene un color amarillo, mientras que un valor negativo de este aspecto es un color azul. Por último, la L^* que es la claridad, se tiene que si su valor es 0 se tiene una absorción total, teniendo el color negro, mientras que más cercano a 100 el valor de este, se tiene un color más cercano a blanco (X-Rite, 2002).

Figura 15. Gráfica de color para escala CIELAB con los parámetros a^* y b^*



Fuente. X-Rite (2002)

Figura 16. Gráfica de color en tres dimensiones con eje horizontal de claridad (L)



Fuente. X-Rite (2002)

2. Número Kappa

Este es un número que se encarga de evaluar la cantidad de lignina que queda presente en la pulpa. Cuando el valor de este es elevado se puede significar que necesita una mayor cantidad de tratamiento para el blanqueamiento, y por otro lado si se tiene un menor número, se requiere menor tratamiento de blanqueamiento. Este número puede ser utilizado como un indicador de calidad de la pulpa, pues si este tiene un número menor significa que hay menos lignina presente en la pasta de celulosa (Altamirano, 2010).

3. Humedad

Según Martines y Lira (2010), es importante conocer la constitución de los materiales sólidos, siendo la materia seca y el agua, para así obtener una masa total del producto. La masa total equivale a la masa de agua y la masa del sólido seco como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Masa total de un sólido y su composición

$$m_h = m_s + m_{H_2O}$$

En donde:

- m_h : masa del sólido húmedo, masa total inicial
- m_s : masa del sólido seco, masa final
- m_{H_2O} : masa de agua en el sólido

El agua que está presente en la muestra sí puede depender del tamaño de esta, sin embargo, si nos enfocamos en el concepto de humedad, se puede convertir dicha propiedad extensiva en una propiedad intensiva, haciéndola independiente del tamaño de la muestra. El contenido de humedad puede ser expresado de dos formas, humedad en base seca o en base húmeda. La humedad en base seca es el cociente de la masa de agua del sólido y su masa seca después del proceso de secado.

Ecuación 2. Contenido de humedad de sólido en base seca

$$\%H_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \times 100 = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

La humedad en base seca sirve para comparar la masa de agua que contiene un sólido con su masa seca, es por esto que si el valor de esta es por ejemplo 300%, significa que la masa de agua presente en el material es 3 veces su masa seca. Teniendo principalmente materia seca, se obtiene que el contenido de humedad se aproxima a 0% en base seca. Si un material tiene alto contenido de humedad, con esta definición no se puede determinar cuando el material se encuentra saturado de agua. Si se tienen materiales con alto contenido de agua, y que la masa seca es pequeña ($m_s \ll m_{H_2O}$), se puede observar un alto valor de humedad en base seca, y no se puede obtener un límite para su análisis.

Por otro lado, el contenido de humedad en base húmeda es el cociente de la masa de agua y la masa total del sólido, es decir, la masa húmeda.

Ecuación 3. Contenido de humedad de sólido en base húmeda

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \times 100 = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100$$

En este caso, la humedad representa el porcentaje de masa de agua que la muestra contiene, respecto a la masa total del sólido. En este caso la humedad es menor a la unidad, pues es una parte de la humedad total.

4. Adición de aditivos

Los aditivos químicos se utilizan en la industria del cartón y materiales de empaque para dar principalmente resistencia húmeda y seca permitiendo cumplir con los requisitos de calidad para el proceso de fabricación. Desarrollar estas resistencias es importante para cualquier grado que se quiere tener en el material, pues es considerada una parte crítica de la fabricación. Al agregar los aditivos se permite tener una mejor eficiencia en la máquina, así como tener nuevos desarrollos con un papel mejorado.

Entre algunas empresas reconocidas que ofrecen este tipo de aditivos se encuentran *Nalco Water*, *Solenis* y *Michelman*. La elección de la empresa depende de las necesidades del cliente y las facilidades que presenta el proveedor. *Michelman* ofrece diferentes aditivos dependiendo del uso del mismo y de la necesidad de la característica final que se le quiere dar al producto. Por ejemplo, se tiene el aditivo *Coating X300* de *Michelman*, el cual no es abrasivo, brinda altos niveles de resistencia al agua en la aplicación industrial, y también permite tener la humedad adecuada para permitir la manipulación del producto (Michelman, 2020).

V. ANTECEDENTES

Actualmente, en el país no se cuenta con información para los procesos de laminado, prensado y secado de pulpa celulósica de raquis de banano. Hasta el momento se trabajó con investigaciones previas del presente año, siendo los trabajos de graduación de Lesly Eunice Zelada y Lai-Wah Elisa Serrano, para contar con la información de deslignificación y procesos de blanqueamiento de la pulpa, respectivamente. Estos trabajos de graduación fueron realizados en 2021, en la Universidad del Valle de Guatemala para la licenciatura en ingeniería química industrial.

Basado en el primer trabajo, “Evaluación de deslignificación de raquis de banano para la elaboración de pasta celulósica” (Zelada, 2021) se prosiguió con la presente investigación, pues se estableció que el raquis de banano sí podía ser deslignificado a diferentes porcentajes, permitiendo remover la lignina para conservar la celulosa de esta parte de la plantación y así poder crear un nuevo producto. En este trabajo de graduación se realizaron diferentes pruebas para poder establecer cual es el porcentaje de deslignificación adecuado para trabajar esta pasta celulósica, así como las pruebas de calidad previa y posteriormente a este proceso para identificar los parámetros aceptables de la misma.

Por otra parte, el segundo trabajo llamado “Evaluación de decoloración en pulpa celulósica deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo ECF y TCF” (Serrano, 2021) se utilizó para determinar los posibles métodos de blanqueo a los cuales la pulpa puede ser sometida para mejorar su presentación final. En este trabajo se compararon dichos métodos para así determinar cual es más amigable con el ambiente y cual tiene un mejor desempeño. A pesar de esto, la información necesaria para este trabajo fue que estos métodos sí son adecuados para blanquear la pulpa.

De igual forma, se utilizó el artículo de Chai y Zhu (1999), en el cual se establece que el número Kappa puede ser determinado de una manera más sencilla utilizando un espectrofotómetro. En este caso, los autores proponen que se utilice la siguiente ecuación para la obtención del valor de interés:

Ecuación 4. Expresión de número Kappa a partir de absorbancia en espectrofotómetro

$$K = \frac{a}{w} \left(1 - \frac{A_e}{A_0} \right)$$

En donde:

- K: número Kappa
- a: cantidad de permanganato de potasio utilizado para la lectura de la absorbancia (mL)

- w: peso de la muestra utilizado (g)
- A_c : absorbancia leída de la muestra a la longitud de onda determinada para trabajar (553 nm)
- A_0 : absorbancia leída de permanganato de potasio y ácido sulfúrico en el barrido a la longitud de onda determinada según pico (553 nm)

Se utilizó el artículo de Martines y Lira (2010), para determinar las relaciones de equivalencia entre las humedades de base húmeda y de base seca, para así permitir convertir el valor de humedad de una base a otra, siendo independiente a la masa de la muestra. Los autores establecen que si los materiales son de bajo contenido de humedad, siendo menor a 3% en cualquier base, los valores de ambas humedades son similares. Por último establecen que el criterio de elección de uso de humedad depende de los datos disponibles para realizar los cálculos.

Ecuación 5. Conversión de humedad de sólido de base seca a base húmeda

$$\%H_{bh} = \frac{\%H_{bs}}{(100 + \%H_{bs})} \times 100$$

Ecuación 6. Conversión de humedad de sólido de base húmeda a base seca

$$\%H_{bs} = \frac{\%H_{bh}}{(100 + \%H_{bh})} \times 100$$

Ecuación 7. Conversión de ambas bases de humedad incluyendo la masa húmeda y seca del sólido

$$\%H_{bs} = \frac{m_h}{m_s} \times \%H_{bh}$$

Para determinar el costo de producción de la aplicación del presente trabajo, siendo los embalajes para huevos, se utilizaron los datos obtenidos del trabajo de Lesly Zelada, previamente mencionado. El costo de 150 g de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos fue de Q7.17, siendo el costo unitario de Q0.05/g. Este dato incluye todo lo necesario para la deslignificación, tomando en cuenta el hidróxido de sodio, el agua, electricidad e insumos adicionales como bolsas plásticas. Este costo es incrementado conforme aumenta la concentración de hidróxido de sodio y el tiempo de deslignificación.

VI. METODOLOGÍA

A. OBSERVACIÓN

1. Se solicitó una cita para visitar la finca de plantación de banano.
2. Se visitó la plantación de banano Cavendish en Escuintla, Guatemala en la fecha acordada.
3. Se hizo una entrevista al gerente de producción de la finca.
4. Se solicitaron muestras de raquis de banano para empezar las pruebas.
5. Se mantuvo comunicación para próximas pruebas con otros raquis en posteriores producciones.

B. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LA PULPA A USAR

Materiales y equipo:

- Balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120 (especificaciones en anexos)
- Probeta marca ValueWare de 100 ± 0.5 mL
- 1,100 mL de agua destilada
- Balanza analítica marca OHAUS, modelo PA114 (especificaciones en anexos)
- Buffer rojo de pH 4.01 ± 0.02 marca Hach.
- Buffer verde de pH 7.00 marca Merck.
- Buffer amarillo de pH 10.00 marca Merck.
- 6 gramos de muestra de pulpa deslignificada y blanqueada
- Espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer, modelo Lambda 35 (especificaciones en anexos)
- 3.16 g de permanganato de potasio, marca Merck al 99% (especificaciones en anexos)
- Papel aluminio
- Balón de aforo de $1,000 \pm 0.40$ mL
- 53.6 mL de ácido sulfúrico marca Merck al 95-97% (especificaciones en anexos)
- Balón de aforo de 500 ± 0.25 mL
- 2 celdas de cuarzo marca Purshee Experiment
- 2 beakers marca Kimble de 100 ± 5 mL
- 1 pipeta graduada marca Kimax de 5 ± 0.05 mL
- 1 pipeteador
- Kimwipes marca Kimtech
- 1 piseta de agua destilada

- Agitador magnético
- Estufa y agitador

1. Para determinar la humedad de la pulpa deslignificada y blanqueada se utilizó el equipo de la balanza de humedad
 - a. Se seleccionó el método de “pulpa” en la balanza de humedad.
 - 1) Si el método no se encontraba disponible, se agregó un nuevo método.
 - 2) Se ingresó la temperatura de secado de 105 °C.
 - 3) Se dejó registrado el método para posteriores usos.
 - b. Se taró el equipo y se colocaron 0.500 ± 0.010 g de pulpa.
 - c. Se cerró la tapa y se dejó secar las muestras, hasta que el equipo avisó que la lectura fue completada.
 - d. Al terminar el proceso se registró la humedad y se descartó la muestra en el basurero (Ohaus, 2018).
2. Para determinar la densidad se utilizó el método gravimétrico.
 - a. Se pesaron 4 g de la pulpa deslignificada y blanqueada al aire, registrando su valor.
 - b. Se pesó la muestra sumergida en agua (líquido auxiliar con densidad conocida) y nuevamente se registró su valor. Se taró el recipiente con agua para tener el peso solamente de la muestra.
 - c. Para obtener la densidad, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Obtención de densidad de pulpa deslignificada y blanqueada por el método gravimétrico

$$\rho = \frac{A}{A - B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L$$

Donde:

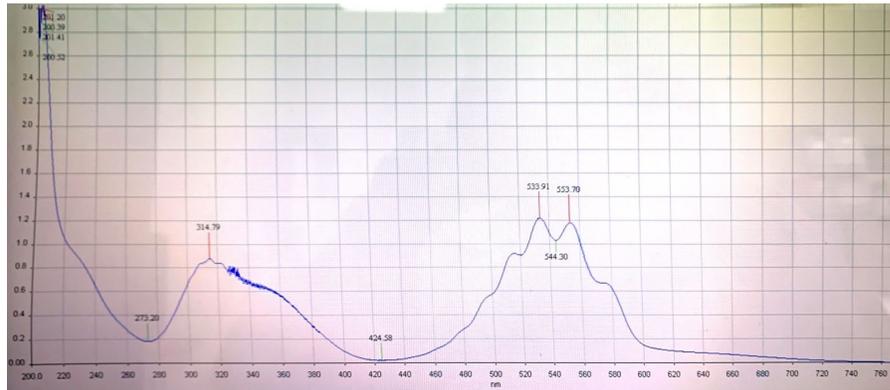
- ρ : densidad de la muestra (g/mL)
- A: peso de la muestra al aire (g)
- B: peso de la muestra en el líquido auxiliar (g)
- ρ_0 : densidad del líquido auxiliar (g/mL)
- ρ_L : densidad del aire a la temperatura de operación (g/mL)

(Mettler Toledo, 2020)

3. Para determinar el pH del producto se utilizó el método TAPPI T 509, siendo este en frío
 - a. Se calibró el potenciómetro PCSTestr 35 de Waterproof, utilizando los buffers correspondientes al equipo.
 - 1) Se calibró con buffer rojo pH 4.01 ± 0.02 marca Hach.
 - 2) Se calibró con buffer verde pH 7.00 marca Merck.
 - 3) Se calibró con buffer amarillo pH 10.00 marca Merck.
 - b. Se coartaron cinco muestras de 5 cm x 5 cm de la lámina ya seca sin tocarlas directamente con los dedos.
 - c. De cada muestra se pesó 1 ± 0.01 g, sin incluir cualquier muestra que tuviera contacto directo con la mano.
 - d. Se transfirió la muestra a un beaker de 100 mL.
 - e. Se agregaron 5 mL de agua destilada y se maceró la muestra con un mortero y un pistilo, procurando que toda la muestra estuviese mojada.
 - f. Se agregaron 65 mL de agua destilada al beaker donde estaba la muestra y se mezclaron hasta deshacerla toda.
 - g. Se tapó el beaker con parafilm y se dejó reposar a temperatura ambiente (18 ± 5 °C) por una hora.
 - h. Se mantuvieron el potenciómetro, los buffers, el agua destilada y la solución de muestras a la misma temperatura ambiente.
 - i. Después de una hora, se prosiguió a la lectura con el potenciómetro calibrado, se mantuvo el equipo dentro de la solución por un minuto para que la lectura fuese estable y se registró el resultado.
 - j. Se lavó el potenciómetro entre cada lectura para asegurar que esta no se viese afectada.
 - k. Se descartó la muestra líquida en el desagüe y la pulpa sobrante se descartó en el basurero. Se recogió y lavó la cristalería después de remojar adecuadamente.
 - l. Se reportaron las lecturas con a la unidad 0.01 pH más cercana (TAPPI, 2006).

4. Para determinar el número Kappa por espectrofotometría, se realizó el siguiente procedimiento:
- a. Se preparó una solución estandarizada de permanganato de potasio 0.1 N.
 - 1) Se disolvieron 3.16 g de permanganato de potasio en 50 mL de agua destilada.
 - 2) Se agregó un magneto al beaker y se llevo a una estufa con agitación.
 - 3) Se calentó a 90 °C y manteniendo una agitación constante.
 - 4) Cuando se disolvió por completo el permanganato, se dejó que la solución llegase a 25 °C.
 - 5) Se trasvasó la solución a un balón de aforo de 1 L y se aforó con agua destilada.
 - 6) Se agitó el balón para tener una solución homogénea por 20 segundos, de manera cuidadosa.
 - 7) Se cubrió el balón de aforo con papel aluminio y se dejó reposar la solución por dos días.
 - 8) Se filtró la solución al vacío con un embudo Büchner y un kitasato.
 - b. Se preparó el ácido sulfúrico con una concentración de 2 M.
 - 1) Con un baño de hielo, se enfriaron 100 mL de agua destilada hasta 15 °C.
 - 2) Al alcanzar la temperatura, se añadieron 25 mL de ácido sulfúrico 99.9% y se enfrió nuevamente a 15 °C.
 - 3) Se añadieron 28.6 mL de ácido sulfúrico 99.9%, y se esperó a que llegar a temperatura ambiente.
 - 4) A un balón de aforo de 500 mL, se agregaron 100 mL de agua destilada y la solución de ácido sulfúrico.
 - 5) Se llevó el balón de aforo a un baño de hielo para alcanzar temperatura ambiente.
 - 6) Se aforó el balón con agua destilada.
 - 7) Se guardó la solución en recipiente de vidrio.
 - c. Se realizó un barrido inicial, teniendo 5 mL de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M, para determinar la onda en la que se realizarían las demás lecturas.

Figura 17. Barrido de onda en Espectrofotómetro UV/VIS



Fuente. Elaboración de la gráfica en Software de Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 3535 del Laboratorio *Global Quality S.A.*

Nota. Se realizó el barrido con la solución de 5 mL de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M, teniendo dos picos en 533.91 nm y 553.70 nm. Se trabajó con la segunda cresta, tomando como referencia 553 nm y 1.2 su respectiva absorbancia, siendo estos los datos iniciales a utilizar.

- d. Se llenó la celda de cuarzo del espectrofotómetro con el blanco a utilizar, el cual en este caso fue ácido sulfúrico 2 M. Se realizó la lectura. (Ver anexos)
- e. Se pesó 0.100 ± 0.010 g de pulpa blanqueada y deslignificada en un beaker de 100 mL.
- f. Se agregaron 5 mL de solución de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M.
- g. Se agregó un agitador magnético y la muestra se llevó a agitación constante.
- h. Se tomó la primera muestra de la solución con cuidado de solo llevar solución, utilizando una pipeta. Se tomó la muestra suficiente para llenar la celda de cuarzo de 10 mm que fue utilizada en el espectrofotómetro.
- i. Se colocó la celda con la muestra en el espectrofotómetro UV/VIS.
- j. Se realizó la lectura de absorbancia a 553 nm, realizando triplicado.
- k. Se devolvió la muestra utilizada para la lectura al beaker con agitación.
- l. Se limpió la celda del espectrofotómetro utilizando Kimwipes.
- m. Se agitó la muestra por 10 minutos y se prosiguió a la siguiente lectura, realizando el mismo procedimiento de llenar la celda, llevar al equipo y realizar la lectura.

- n. Se descartó la muestra en los desechos y la mezcla de permanganato permanganato de potasio y ácido sulfúrico 2 M fue descartada en el recipiente indicado (Chai & Zhu, 1999).

C. PREPARACIÓN DE LÁMINAS

Materiales y equipo:

- Marcos de madera con malla
 - 1 probeta de $2,000 \pm 5$ mL
 - Agua
 - 500 g de pulpa deslignificada y blanqueada
 - Recipiente profundo (para colocar la pulpa y sumergir los marcos)
 - Micrómetro digital marca Beslands, modelo 0-25 mm (especificaciones en anexos)
 - Toalla
 - Balanza marca Ohaus modelo V31XH2 con precisión 0.1 g (especificaciones en anexos)
1. Se pesaron los marcos a utilizar para realizar el laminado; un marco de 31.6 cm x 13.5 cm; dos marcos de 40 cm x 30 cm y dos marcos de 75 cm x 55 cm y se registró su masa.
 2. Se colocó la pulpa deslignificada y blanqueada en un recipiente profundo (138 x 58 x 11 cm), para permitir el uso de los marcos.
 3. Se agregaron 6 litros de agua a 500 g de pulpa deslignificada y blanqueada en el recipiente.
 4. Se dejó reposar la pulpa en el recipiente y se mezcló para que esta quedara más uniforme.
 5. Se sumergieron los marcos en el recipiente para tener una capa uniforme de pulpa.
 6. Se homogenizó capa de pulpa en el marco con ayuda de una toalla.
 7. Se midió el espesor de la plancha con un micrómetro en cinco puntos de la misma para determinar un promedio del espesor; procurando que estuviese uniforme.
 8. Se pesaron los marcos con la pulpa y se registró el valor para obtener la masa de la pulpa en cada marco.
 9. Se realizó este procedimiento para todas las muestras trabajadas.

D. PRENSADO DE LÁMINA

Materiales y equipo:

- 100 g de pulpa deslignificada y blanqueada
- Pedazo de tela para cubrir la muestra
- Prensa hidráulica marca Carver modelo 3912 (especificaciones en anexos)
- Balanza marca Ohaus, modelo V31XH2 con precisión de 0.1 g (especificaciones en anexos)
- Regla de 30 ± 0.05 cm marca Bolik
- Micrómetro digital marca Beslands, modelo 0-25mm (especificaciones en anexos)

1. Si la lámina iba a ser prensada, se debía tomar una muestra de aproximadamente 100 ± 5 gramos.
2. Se colocó la muestra en la prensa hidráulica entre una tela para que fuese más fácil sacarla.
3. Se le aplicó una presión aproximada de 8 toneladas métricas a la muestra.
4. Se sacó la muestra de la prensa hidráulica, y se llevó a una balanza analítica para determinar su peso previo al secado.
5. Se midió el espesor de la muestra con un micrómetro en cinco puntos diferentes para obtener un espesor promedio. Y se midieron sus dimensiones para determinar el área superficial de la muestra.

E. SECADO

Materiales y equipo:

- Secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, marca Corbett Industries Inc., modelo EC-404-6 (especificaciones en anexos).
 - Termocuplas marca Extech Instruments, modelo TM 25 (especificaciones en anexos).
 - Higrómetro marca Extech Instruments, modelo Meter RH101 (especificaciones en anexos).
 - Anemómetro marca The art of measurement, modelo AE58780 (especificaciones en anexos).
 - Cronómetro
 - Muestras laminadas o prensadas desarrolladas
1. Se encendió el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle.
 2. Se programó la temperatura del equipo a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 3. Se empezó el proceso de secado sin pulpa para obtener un calentamiento parejo en el equipo. Con el uso de una termocupla, se midió la temperatura en diferentes puntos del secador para determinar que se tenía un proceso casi homogéneo.
 4. Después de 30 minutos, se colocaron los marcos en las bandejas del equipo, distribuidos correctamente (se comenzó en forma de zig zag y luego se llenaron los espacios según la cantidad de muestras).
 5. Se comenzó a tomar el tiempo del proceso.
 6. En intervalos de 30 minutos se pesaban nuevamente los marcos para así poder ir construyendo la curva de sacado de humedad respecto al tiempo. Con el nuevo peso que se obtenía, se determinaba la pérdida de humedad de la muestra.
 7. En los mismos intervalos de tiempo se determinó la velocidad de secado con la relación del peso del agua y el sólido seco.

8. Durante el proceso se tomó la velocidad de entrada y de salida del aire utilizando un anemómetro, colocandolo donde se movía el aire. De igual forma en estos lugares, se realizaron las mediciones de temperatura y humedad del aire con el higrómetro.
9. Se continuó con el proceso hasta obtener una humedad adecuada según las normativas del cartón (entre 3% y 10% según “Carton, Crates and Corrugated Board”). Al tener la humedad deseada se sacaron las muestras del equipo y se realizaron las curvas de secado del proceso con los datos recabados.

F. CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO

Materiales y equipo:

- Balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB 120 (especificaciones en anexos)
- Probeta marca ValueWare de 100 ± 0.5 mL
- 1,100 mL de agua destilada
- Balanza analítica marca OHAUS, modelo PA114 (especificaciones en anexos)
- Buffer rojo de pH 4.01 ± 0.02 marca Hach.
- Buffer verde de pH 7.00 marca Merck.
- Buffer amarillo de pH 10.00 marca Merck.
- 6 gramos de muestra de pulpa deslignificada y blanqueada
- Espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer, modelo Lambda 35 (especificaciones en anexos)
- 3.16 g de permanganato de potasio, marca Merck al 99% (especificaciones en anexos)
- Papel aluminio
- Balón de aforo de $1,000 \pm 0.40$ mL
- 53.6 mL de ácido sulfúrico marca Merck al 95-97% (especificaciones en anexos)
- Balón de aforo de 500 ± 0.25 mL
- 2 celdas de cuarzo marca Purshee Experiment
- 2 beakers marca Kimble de 100 ± 5 mL
- 1 pipeta graduada marca Kimax de 5 ± 0.05 mL
- 1 pipeteador
- Kimwipes marca Kimtech
- 1 piseta de agua destilada
- Agitador magnético
- Estufa y agitador
- Micrómetro digital marca Beslands, modelo 0-25 mm (especificaciones en anexos)

1. Para determinar el pH del producto se utilizó el método TAPPI T 509, siendo este en frío
 - a. Se calibró el potenciómetro PCSTestr 35 de Waterproof, utilizando los buffers correspondientes al equipo.
 - 1) Se calibró con buffer rojo pH 4.01 ± 0.02 marca Hach.
 - 2) Se calibró con buffer verde pH 7.00 marca Merck.
 - 3) Se calibró con buffer amarillo pH 10.00 marca Merck.
 - b. Se tomaron cinco muestras de 5 cm x 5 cm de lámina ya seca sin tocarlas directamente con los dedos.
 - c. De cada muestra se tomó 1 ± 0.01 g, sin incluir cualquier muestra que tuvo contacto directo con la mano.
 - d. Se transfirió la muestra a un beaker de 100 mL.
 - e. Se agregaron 5 mL de agua destilada y se maceró la muestra con un mortero y un pistilo, procurando que toda la muestra estuviese mojada.
 - f. Se agregaron 65 mL de agua destilada al beaker donde estaba la muestra y se mezclaron hasta deshacerla toda.
 - g. Se tapó el beaker con parafilm y se dejó reposar a temperatura ambiente (18 ± 5 °C) por una hora.
 - h. Se mantuvieron el potenciómetro, los buffers, el agua destilada y la solución de muestras a la misma temperatura ambiente.
 - i. Después de una hora, se prosiguió a la lectura con el potenciómetro calibrado, se mantuvo el equipo dentro de la solución por un minuto para que la lectura fuese estable y se registró el resultado.
 - j. Se lavó el potenciómetro entre cada lectura para asegurar que esta no se viese afectada.
 - k. Se descartó la muestra líquida en el desagüe y la pulpa sobrante se descartó en el basurero. Se recogió y lavó la cristalería después de remojar adecuadamente.
 - l. Se reportaron las lecturas con a la unidad 0.01 pH más cercana (TAPPI, 2006).
2. Se determinó la masa con una balanza.
 - a. Se retiraron las láminas de los marcos.
 - b. Se llevaron las muestras a una balanza con precisión de 0.1 g.
 - c. Se registró la masa obtenida.

3. Se determinó la densidad de la lámina seca por el método gravimétrico.
 - a. Se pesaron 4 g de la muestra de la pulpa al aire de la plancha ya seca.
 - b. Se pesó la misma muestra sumergida en agua (líquido auxiliar con densidad conocida) y nuevamente se registró su valor. Se taró el recipiente con agua para tener el peso solamente de la muestra.
 - c. Para obtener la densidad, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Obtención de densidad de lámina seca por el método gravimétrico

$$\rho = \frac{A}{A - B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L$$

Donde:

- ρ : densidad de la muestra (g/mL)
- A: peso de la muestra al aire (g)
- B: peso de la muestra en el líquido auxiliar (g)
- ρ_0 : densidad del líquido auxiliar (g/mL)
- ρ_L : densidad del aire a la temperatura de operación (g/mL)

(Mettler Toledo, 2020)

4. Se determinó el porcentaje de humedad del producto según el método AOAC 925.10, determinando la variación del peso del producto estando húmedo y seco y utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Porcentaje de humedad según método AOAC 925.10

$$\% \text{ Humedad} = 1 - \left(\frac{M - m}{M} \times 100 \right)$$

Donde:

- M: peso inicial del producto en gramos
- m: peso del producto seco en gramos

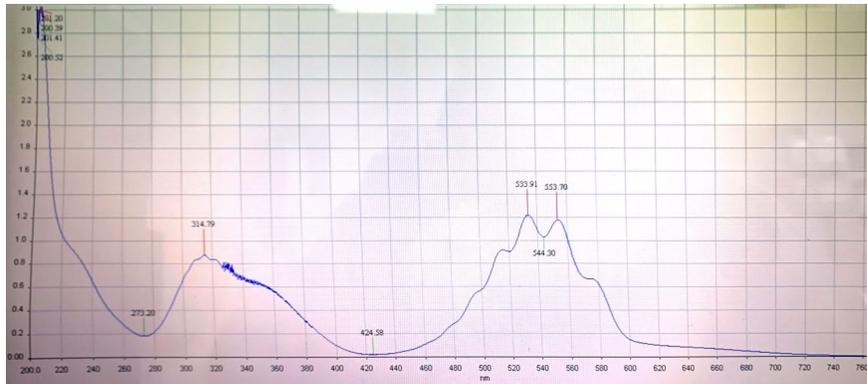
(AOAC, 2005)

5. Se determinó la humedad del producto con la balanza de humedad para la comparación de datos.
 - a. Se seleccionó el método de “pulpa” en la balanza de humedad.
 - 1) Si el método no se encontraba disponible, se agregó un nuevo método.
 - 2) Se ingresó la temperatura de secado de 105 °C.
 - 3) Se dejó registrado el método para posteriores usos.

- b. Se taró la balanza de humedad y se pesaron 0.500 ± 0.010 g de la lámina seca.
 - c. Se colocó la cerró la tapa y se dejó secar, hasta que el equipo avisó que la lectura fue completada.
 - d. Al terminar el proceso se registró la humedad y se descartó la muestra en el basurero (Ohaus, 2018).
6. Se midió el espesor con un micrómetro.
 - a. Se tomó una lámina seca.
 - b. Se tomaron mediciones del espesor en cinco partes diferentes de la lámina, cubriendo los extremos y el centro.
 - c. Se realizó un promedio de los espesores obtenidos para tener espesor de la lámina.
7. Se utilizó un Densitómetro X-rite Exact Basic con luz D50 para la medición de los colores de las láminas obtenidas. Se trabajó con la escala de color CIELAB L a* b*. Se tomaron las muestras y estas fueron colocadas debajo del equipo, en el espacio de lectura para así obtener los valores.
8. Para determinar el número Kappa por espectrofotometría, se realizó el siguiente procedimiento:
 - a. Se preparó una solución estandarizada de permanganato de potasio 0.1 N.
 - 1) Se disolvieron 3.16 g de permanganato de potasio en 50 mL de agua destilada.
 - 2) Se agregó un magneto al beaker y se llevó a una estufa con agitación.
 - 3) Se calentó a 90 °C y manteniendo una agitación constante.
 - 4) Cuando se disolvió por completo el permanganato, se dejó que la solución llegase a 25 °C.
 - 5) Se trasvasó la solución a un balón de aforo de 1 L y se aforó con agua destilada.
 - 6) Se agitó el balón para tener una solución homogénea por 20 segundos, de manera cuidadosa.
 - 7) Se cubrió el balón de aforo con papel aluminio y se dejó reposar la solución por dos días.
 - 8) Se filtró la solución al vacío con un embudo Büchner y un kitasato.

- b. Se preparó el ácido sulfúrico con una concentración de 2 M.
- 1) Con un baño de hielo, se enfriaron 100 mL de agua destilada hasta 15 °C.
 - 2) Al alcanzar la temperatura, se añadieron 25 mL de ácido sulfúrico 99.9% y se enfrió nuevamente a 15 °C.
 - 3) Se añadieron 28.6 mL de ácido sulfúrico 99.9%, y se esperó a que llegara a temperatura ambiente.
 - 4) A un balón de aforo de 500 mL, se agregaron 100 mL de agua destilada y la solución de ácido sulfúrico.
 - 5) Se llevó el balón de aforo a un baño de hielo para alcanzar temperatura ambiente.
 - 6) Se aforó el balón con agua destilada.
 - 7) Se guardó la solución en recipiente de vidrio.
- c. Se realizó un barrido inicial, teniendo 5 mL de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M, para determinar la onda en la que se realizarían las demás lecturas.

Figura 18. Barrido de onda en Espectrofotómetro UV/VIS



Fuente. Elaboración de la gráfica en Software de Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35 del Laboratorio *Global Quality S.A.*

Nota. Se realizó el barrido con la solución de 5 mL de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M, teniendo dos picos en 533.91 nm y 553.70 nm. Se trabajó con la segunda cresta, tomando como referencia 553 nm y 1.2 su respectiva absorbancia, siendo estos los datos iniciales a utilizar.

- d. Se llenó la celda de cuarzo del espectrofotómetro con el blanco a utilizar, el cual en este caso fue ácido sulfúrico 2 M. Se realizó la lectura. (Ver anexos)
- e. Se pesó 0.100 ± 0.010 g de pulpa blanqueada y deslignificada en un beaker de 100 mL.
- f. Se agregaron 5 mL de solución de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de ácido sulfúrico 2 M.
- g. Se agregó un agitador magnético y la muestra se llevó a agitación constante.
- h. Se tomó la primera muestra de la solución con cuidado de solo llevar solución, utilizando una pipeta. Se tomó la muestra suficiente para llenar la celda de cuarzo de 10 mm que fue utilizada en el espectrofotómetro.
- i. Se colocó la celda con la muestra en el espectrofotómetro UV/VIS.
- j. Se realizó la lectura de absorbancia a 553 nm, realizando triplicado.
- k. Se devolvió la muestra utilizada para la lectura al beaker con agitación.
- l. Se limpió la celda del espectrofotómetro utilizando Kimwipes.
- m. Se agitó la muestra por 10 minutos y se prosiguió a la siguiente lectura, realizando el mismo procedimiento de llenar la celda, llevar al equipo y realizar la lectura.
- n. Se descartó la muestra en los desechos y la mezcla de permanganato de potasio y ácido sulfúrico 2 M fue descartada en el recipiente indicado (Chai & Zhu, 1999).

9. Para determinar el gramaje de las muestras se utilizó la siguiente fórmula, dividiendo el peso final de la muestra entre el área de la muestra tabajada para así tener g/m^2 .

Ecuación 11. Gramaje de muestra

$$\text{Gramaje} = \frac{\text{Peso muestra (g)}}{\text{Área (m}^2\text{)}}$$

10. Para la resistencia de compresión de las muestras se utilizó la prueba del anillo (“Ring crush”), siguiendo la metodología de Tappi T 822:
- a. Cortar una muestra seca de 12.700 ± 0.025 mm de ancho y 152.4 ± 0.200 mm de largo.
 - b. Según el espesor de cada muestra se seleccionó el anillo con el que se iba a trabajar, considerando que debía ser lo más cercano al espesor.
 - c. Se colocó la muestra dentro del anillo y se colocó el disco para tener la muestra en forma de anillo.
 - d. Se colocó el anillo en el equipo de medición y se empezó a ejercer fuerza sobre la muestra.
 - e. Se aplicó la fuerza a una velocidad de 12.5 mm/min, hasta que se llegara a tener el primer doblez de la muestra, siendo la resistencia de compresión medida por el equipo (TAPPI, 2007).

VII. RESULTADOS

Cuadro 1. Espesor de la lámina desarrollada de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF, previo y posterior al proceso de laminado y secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Espesor promedio (± 0.001 mm)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	4.586	1.044
	130	5.322	1.026
10	100	5.235	1.041
	60	5.158	1.054
14	100	5.502	0.697
	<i>Promedio</i>		5.161
<i>Desviación estándar</i>		0.346	0.154

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se midió el espesor promedio de la lámina desarrollada, procurando que esta fuese homogénea, haciendo mediciones en cinco puntos de la muestra con el micrómetro para así tener un valor promedio, utilizando un micrómetro digital marca Beslands, modelo 0-25 mm.

Cuadro 2. Espesor de la lámina desarrollada de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF, previo y posterior al proceso de laminado y secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Espesor promedio (± 0.001 mm)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	5.255	2.999
	130	5.418	3.241
10	100	4.685	3.161
	60	4.335	2.155
14	100	5.051	3.296
	<i>Promedio</i>		4.949
<i>Desviación estándar</i>		0.439	0.469

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se midió el espesor promedio de la lámina, procurando que esta fuese homogénea, haciendo mediciones en cinco puntos de la muestra con el micrómetro para así tener un valor promedio, utilizando un micrómetro digital marca Beslands, modelo 0-25 mm.

Cuadro 3. Caracterización de humedad base húmeda de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Humedad promedio ($\pm 0.6\%$)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	94.71%	9.40%
	130	94.32%	8.20%
10	100	93.44%	9.20%
	60	93.44%	6.56%
14	100	90.22%	7.56%
	<i>Promedio</i>		93.23%
<i>Desviación estándar</i>		1.77%	1.18%

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se calculó la humedad previa al proceso de secado con la balanza de humedad marca Ohaus modelo MB 120, con el método de “pulpa” a 105 °C, para la humedad posterior al proceso se utilizó un promedio según los cálculos realizados en la curva de secado de cada condición, teniendo los resultados en m/m.

Cuadro 4. Caracterización de humedad base húmeda de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Humedad promedio ($\pm 0.6\%$)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	90.43%	9.50%
	130	91.97%	8.60%
10	100	91.91%	9.10%
	60	87.45%	7.19%
14	100	85.74%	8.90%
	<i>Promedio</i>		89.50%
<i>Desviación estándar</i>		2.79%	0.88%

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se calculó la humedad previa al proceso de secado con la balanza de humedad marca Ohaus modelo MB 120, con el método de “pulpa” a 105 °C, para la humedad posterior al proceso se utilizó un promedio según los cálculos realizados en la curva de secado de cada condición, teniendo los resultados en m/m.

Cuadro 5. Caracterización de humedad base seca de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Previo al proceso de secado	Humedad base seca (kg H ₂ O/kg pulpa seca)		
			Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)	Posterior al proceso de secado	Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)
8	100	14.9879	0.1580	0.0718	0.0014
	130	18.8810	0.0965	0.0561	0.0005
10	100	14.5991	0.1200	0.0739	0.0011
	60	14.5358	0.0983	0.0743	0.0009
14	100	13.5353	0.0772	0.0803	0.0009
	<i>Promedio</i>		15.3078	0.1100	0.0713
<i>Desviación estándar</i>		2.0682	0.0308	0.0091	0.0003

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se calculó en base seca, utilizando un promedio según los cálculos realizados en la curva de secado de cada condición, teniendo los resultados de humedad en m/m.

Cuadro 6. Caracterización de humedad base seca de láminas de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Previo al proceso de secado	Humedad base seca (kg H ₂ O/kg pulpa seca)		
			Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)	Posterior al proceso de secado	Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)
8	100	20.0412	0.1263	0.0527	0.0006
	130	18.0995	0.0457	0.0587	0.0003
10	100	21.8964	0.1451	0.0480	0.0006
	60	14.6320	0.1026	0.0738	0.0009
14	100	13.8713	0.0459	0.0782	0.0005
	<i>Promedio</i>		17.7081	0.0931	0.0622
<i>Desviación estándar</i>		3.4396	0.0458	0.0132	0.0002

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Para la humedad en base seca se utilizó un promedio según los cálculos realizados en la curva de secado de cada condición, teniendo los resultados de humedad en m/m.

Cuadro 7. Densidad de la pulpa blanqueada por método ECF, antes y después del proceso de laminado y secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Densidad promedio (g/mL)			
		Previo al proceso de secado	Incertidumbre (± g/mL)	Posterior al proceso de secado	Incertidumbre (± g/mL)
8	100	0.99873	0.00601	0.99914	0.00600
	130	0.99784	0.00601	0.99843	0.00601
10	100	0.99821	0.00601	0.99867	0.00601
14	60	0.99732	0.00601	0.99801	0.00601
	100	0.99675	0.00602	0.99764	0.00601
<i>Promedio</i>		0.99777	0.00601	0.99838	0.00601
<i>Desviación estándar</i>		0.00077	0.00000	0.00058	0.00000

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó la densidad de cada muestra a las diferentes condiciones establecidas de deslignificación con el método de blanqueo ECF y se calculó un promedio.

Cuadro 8. Densidad de la pulpa blanqueada por método TCF, antes y después del proceso de laminado y secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Densidad promedio (g/mL)			
		Previo al proceso de secado	Incertidumbre (± g/mL)	Posterior al proceso de secado	Incertidumbre (± g/mL)
8	100	0.99671	0.00602	0.99786	0.00601
	130	0.99782	0.00601	0.99893	0.00601
10	100	0.99815	0.00601	0.99864	0.00601
14	60	0.99650	0.00602	0.99732	0.00601
	100	0.99565	0.00602	0.99706	0.00601
<i>Promedio</i>		0.99697	0.00602	0.99796	0.00601
<i>Desviación estándar</i>		0.00102	0.00001	0.00081	0.00000

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó la densidad de cada muestra a las diferentes condiciones establecidas de deslignificación con el método de blanqueo TCF y se calculó un promedio.

Cuadro 9. Caracterización de pH de la pulpa blanqueada por método ECF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	pH promedio (± 0.01)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	9.41	9.37
	130	9.10	9.13
10	100	9.34	9.36
	60	9.21	9.24
14	100	9.29	9.31
	<i>Promedio</i>		9.27
<i>Desviación estándar</i>		0.12	0.10

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. La medición del pH de las muestra fue realizada después de una hora de reposo de las mismas a condiciones de ambiente, tapadas para evitar contaminación, utilizando un potenciómetro marca Oakton modelo PCSTestr 32 – Multi Parameter.

Cuadro 10. Caracterización de pH de la pulpa blanqueada por método TCF previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	pH promedio (± 0.01)	
		Previo al proceso de secado	Posterior al proceso de secado
8	100	8.65	9.70
	130	9.51	9.53
10	100	8.98	8.98
	60	9.48	9.51
14	100	9.52	9.61
	<i>Promedio</i>		9.23
<i>Desviación estándar</i>		0.39	0.28

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. La medición del pH de las muestra fue realizada después de una hora de reposo de las mismas a condiciones de ambiente, tapadas para evitar contaminación, utilizando un potenciómetro marca Oakton modelo PCSTestr 32 – Multi Parameter.

Cuadro 11. Caracterización de número Kappa de lámina realizada de pulpa blanqueada por método ECF, previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Número Kappa Promedio			
		Previo al proceso de secado	Incertidumbre	Después de proceso de secado	Incertidumbre
8	100	27.36226	0.30082	27.98421	0.30776
	130	41.30379	0.45423	39.91200	0.43720
	150	37.77163	0.41439	37.69987	0.41158
10	100	34.59306	0.38015	34.67123	0.38112
	130	34.21930	0.37591	34.24176	0.37528
<i>Promedio</i>		35.05001	0.38510	34.90181	0.38259
<i>Desviación estándar</i>		5.16036	0.05668	4.50758	0.04868

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 20 °C.

Nota. El número Kappa de la pulpa fue determinado con un espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer Instruments, modelo Lambda 35, leyendo los valores de absorbancia en la onda 553 nm.

Cuadro 12. Caracterización de número Kappa de lámina realizada de pulpa blanqueada por método TCF, previo y posterior al proceso de secado

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Número Kappa Promedio			
		Previo al proceso de secado	Incertidumbre	Después de proceso de secado	Incertidumbre
8	100	32.60227	0.35700	32.85807	0.36009
	130	44.23732	0.48572	44.64355	0.49076
	150	41.04923	0.45008	41.26586	0.45209
10	100	38.49430	0.42229	38.77801	0.42437
	130	38.41713	0.42122	38.98153	0.42862
<i>Promedio</i>		38.96005	0.42726	39.30540	0.43119
<i>Desviación estándar</i>		4.27631	0.04726	4.30959	0.04768

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 20 °C.

Nota. El número Kappa de la pulpa fue determinado con un espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer Instruments, modelo Lambda 35, leyendo los valores de absorbancia en la onda 553 nm.

Cuadro 13. Caracterización de gramaje de lámina desarrollada de pulpa blanqueada por método ECF

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Gramaje promedio (g/m ²)	Incertidumbre (±g/m ²)
8	100	63.2911	0.9206
	130	127.1683	1.2582
10	100	81.4580	1.0166
	60	82.3965	0.7832
14	100	103.5318	0.9019
	<i>Promedio</i>		91.5691
<i>Desviación estándar</i>		24.4766	0.1782

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 20 °C.

Nota. El gramaje fue determinado con el peso en gramos de la lámina y midiendo su área para obtener g/m².

Cuadro 14. Caracterización de gramaje de lámina desarrollada de pulpa blanqueada por método TCF

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Gramaje promedio (g/m ²)	Incertidumbre (±g/m ²)
8	100	102.5551	1.1281
	130	91.7750	0.4758
10	100	96.6948	1.0972
	60	111.1502	1.2096
14	100	116.5360	1.0413
	<i>Promedio</i>		103.74222
<i>Desviación estándar</i>		10.15934	0.29405

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 20 °C.

Nota. El gramaje fue determinado con el peso en gramos de la lámina y midiendo su área para obtener g/m².

Cuadro 15. Resistencia a la compresión promedio de lámina desarrollada con pulpa blanqueada por método ECF

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
8	100	28.9392
	130	30.3227
10	100	29.0526
	60	29.5969
14	100	30.0732
	<i>Promedio</i>	
<i>Desviación estándar</i>		0.6088

Fuente. Elaboración propia por medio de equipo de Ring Crush de empresa anónima, a condiciones de 0.9948 atm y 33 °C.

Nota. La resistencia fue determinada por equipo especializado en una empresa reconocida del país.

Cuadro 16. Resistencia a la compresión promedio de lámina desarrollada con pulpa blanqueada por método TCF

Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
8	100	30.1548
	130	29.6196
10	100	29.3247
	60	30.0932
14	100	30.1412
	<i>Promedio</i>	
<i>Desviación estándar</i>		0.37565

Fuente. Elaboración propia por medio de equipo de Ring Crush de empresa anónima, a condiciones de 0.9948 atm y 33 °C.

Nota. La resistencia fue determinada por equipo especializado en una empresa reconocida del país.

Cuadro 17. Caracterización de muestra prensada

Característica	Valor	Incertidumbre
Humedad bh previo secado	80.81%	± 0.06%
Humedad bh posterior secado	33.28%	± 0.06%
Humedad bs previo secado	3.5040 kg H ₂ O/kg sólido seco	± 0.0327 kg H ₂ O/kg sólido seco
Humedad bs posterior secado	0.4988 kg H ₂ O/kg sólido seco	± 0.0064 kg H ₂ O/kg sólido seco
Densidad posterior a secado	0.9887 g/mL	± 0.00606 g/mL
pH posterior a secado	9.38	± 0.01
Espesor previo secado	4.11 mm	± 0.001 mm
Espesor posterior secado	2.25 mm	± 0.001 mm
Gramaje	770.2313 g/m ²	± 16.0538 g/m ³

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Esta caracterización se realizó de la base de cálculo de pulpa deslignificada con solución de NaOH al 8% por 100 minutos por el método ECF, y fue prensada con 8 toneladas métricas con la prensa hidráulica del laboratorio de operaciones unitarias.

Cuadro 18. Caracterización de lámina desarrollada

Característica	Valor	Incertidumbre
Humedad bh previo secado	93.30%	± 0.06%
Humedad bh posterior secado	6.70%	± 0.06%
Humedad bs previo secado	14.9879 kg H ₂ O/kg sólido seco	± 0.1580 kg H ₂ O/kg sólido seco
Humedad bs posterior secado	0.0718 kg H ₂ O/kg sólido seco	± 0.0014 kg H ₂ O/kg sólido seco
Densidad posterior a secado	0.99838 g/mL	± 0.00601 g/mL
pH posterior a secado	9.28	± 0.01
Espesor previo secado	4.586 mm	± 0.001 mm
Espesor posterior secado	1.044 mm	± 0.001 mm
Gramaje	63.2911 g/m ²	± 0.9206 g/m ³

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Esta caracterización se realizó de la base de cálculo de pulpa deslignificada con solución de NaOH al 8% por 100 minutos por el método ECF sin ser prensada.

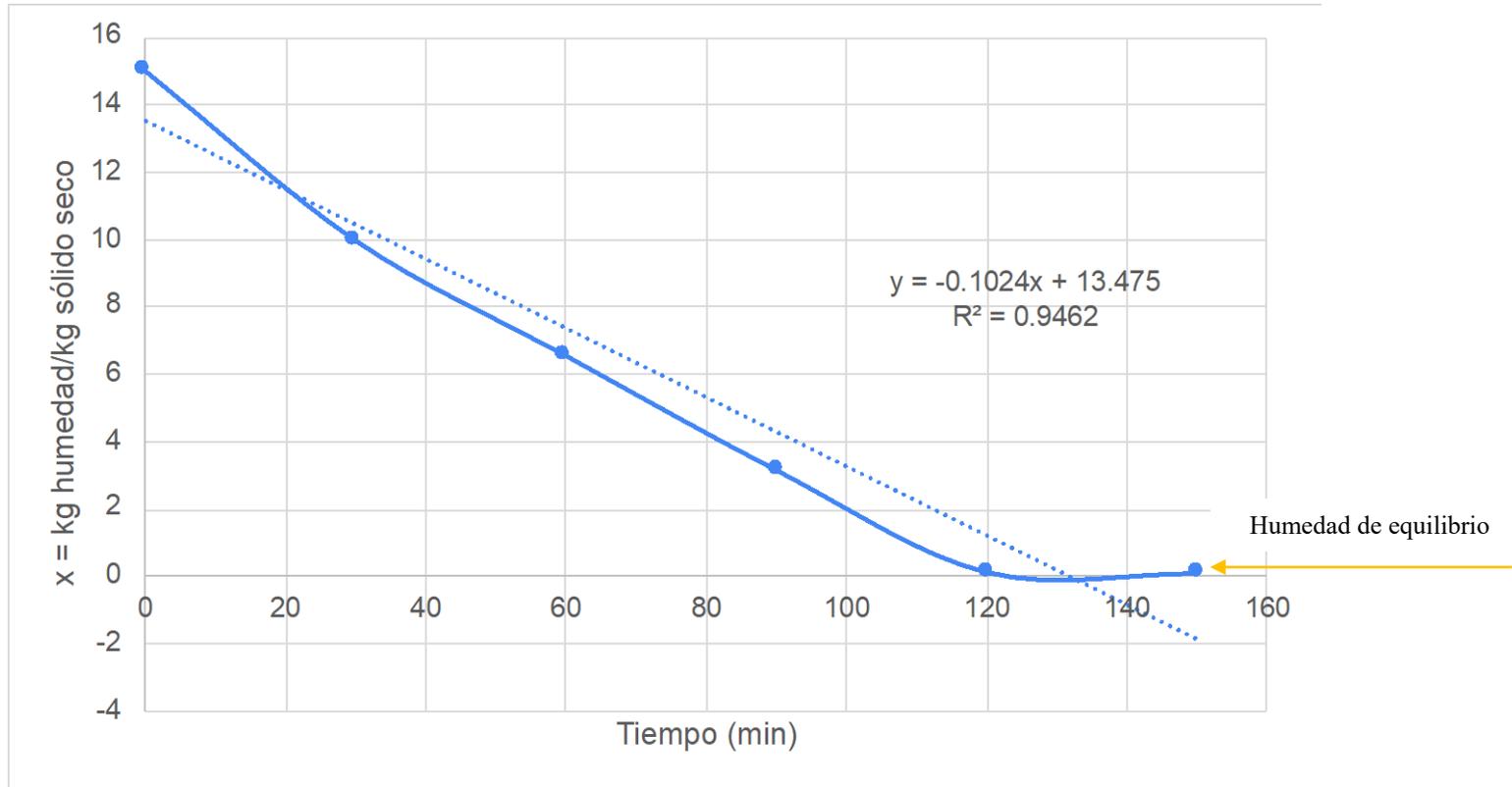
Cuadro 19. Caracterización de color de pulpa posterior al proceso de laminado y secado

Método de blanqueo	Muestra		Parámetros CIELAB			Reflejo (%)	Color
	Concentración de solución NaOH para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	L	a*	b*		
ECF	8	100	77.1	-1.3	12.35	19%	
		130	77.4	-1.41	12.88	19%	
		150	75.7	2.19	21.76	17%	
	10	100	77.3	-0.92	11.97	19%	
		130	78.7	0.35	10.31	20%	
		150	76.22	1.99	19.45	17%	
	12	100	76.8	-1.48	12.46	19%	
		130	78.1	0.72	10.87	19%	
	14	130	77.9	-0.49	14.68	19%	
TCF	8	100	80.4	-1.72	9.33	20%	
		130	81.3	-0.79	8.51	21%	
		150	79.6	-2.01	11.75	20%	
	10	100	79.9	-0.91	8.93	21%	
		130	81.8	-0.22	8.11	21%	
		150	78.8	-1.73	10.98	20%	
	12	100	81.2	0.94	8.59	21%	
		130	81.4	0.54	9.01	21%	
	14	130	78.9	1.78	12.44	20%	
Papel periódico			90	0.2	-4.5	25%	

Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. El análisis de color fue realizado con Densitómetro X-rite Exact Basic con luz D50, utilizando los parámetros de color CIELAB.

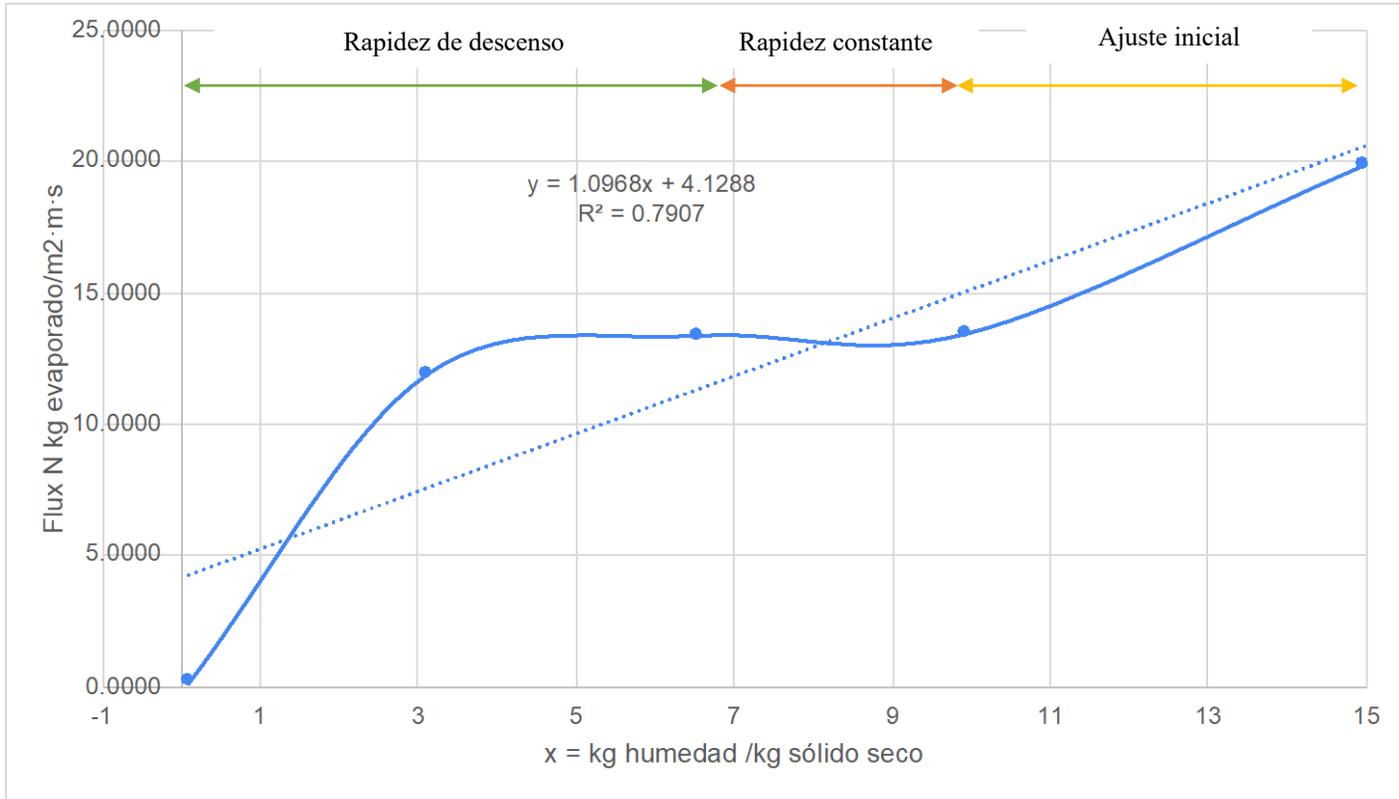
Figura 19. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se utilizó como base de cálculo la condición de deslignificada con solución de hipoclorito de sodio al 8%, por 100 minutos. En este caso se llegó a una humedad final de $7.18 \pm 0.14\%$ m/m en base seca, con un tiempo de secado de 150 minutos a 120 °C. Se tomó como peso de base seca 10.0764 ± 0.1 g.

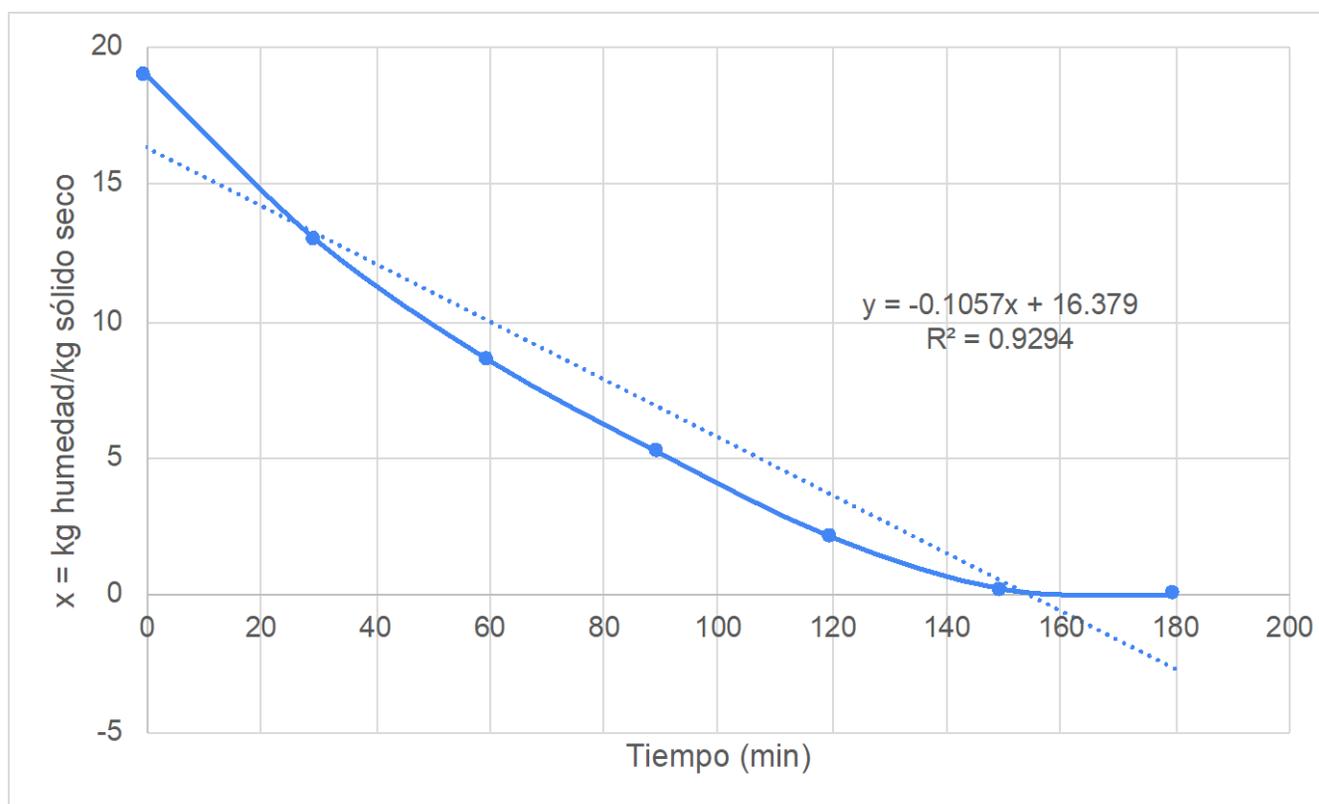
Figura 20. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua, teniendo así un flux final de 0.1563 x 10³ kg evaporados/m²·m·s

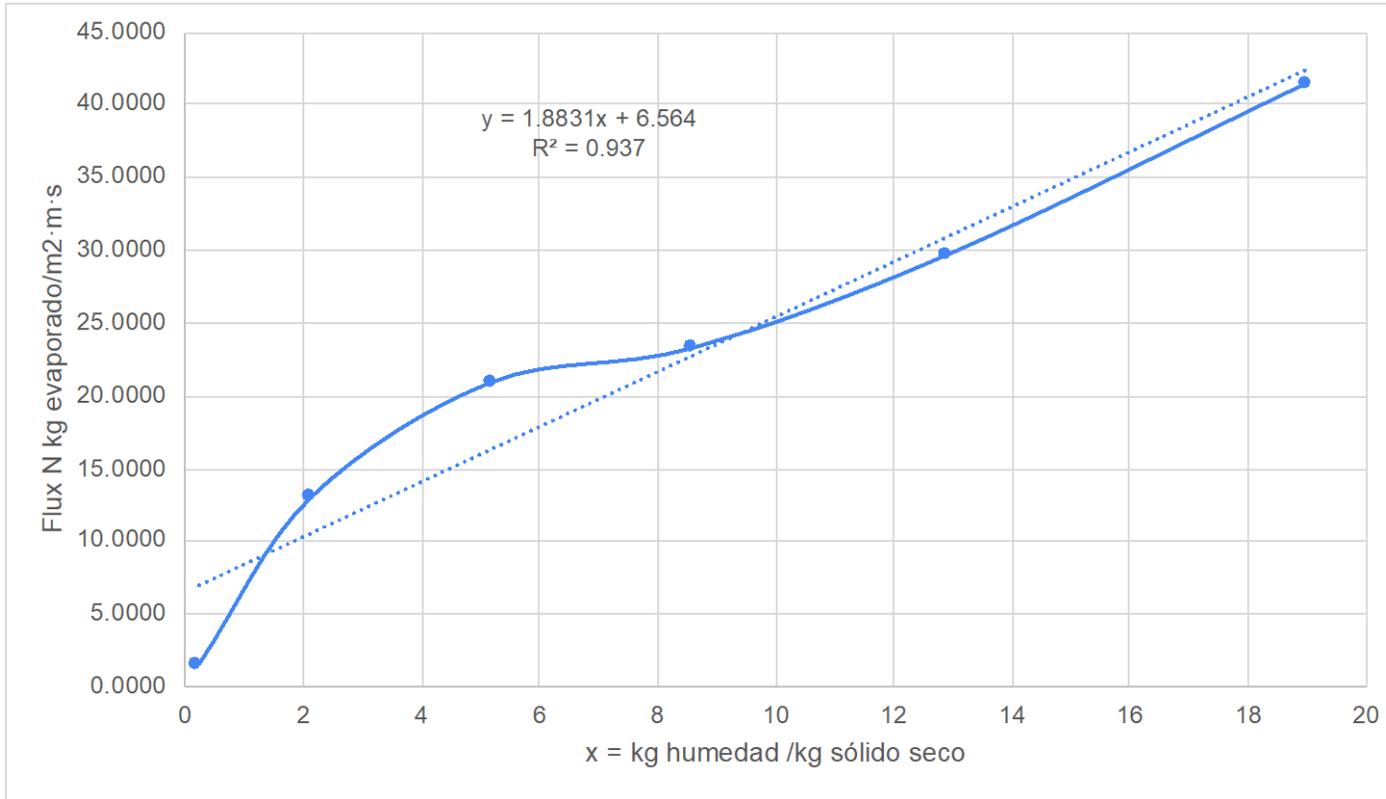
Figura 21. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 min y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se utilizó como base de cálculo la condición de deslignificado con solución de hipoclorito de sodio al 8%, por 100 minutos. En este caso se llegó a una humedad final de $5.27 \pm 0.06\%$ m/m en base seca, con un tiempo de secado de 180 minutos a 120 °C. Se tomó como peso de base seca 16.6245 ± 0.1 g.

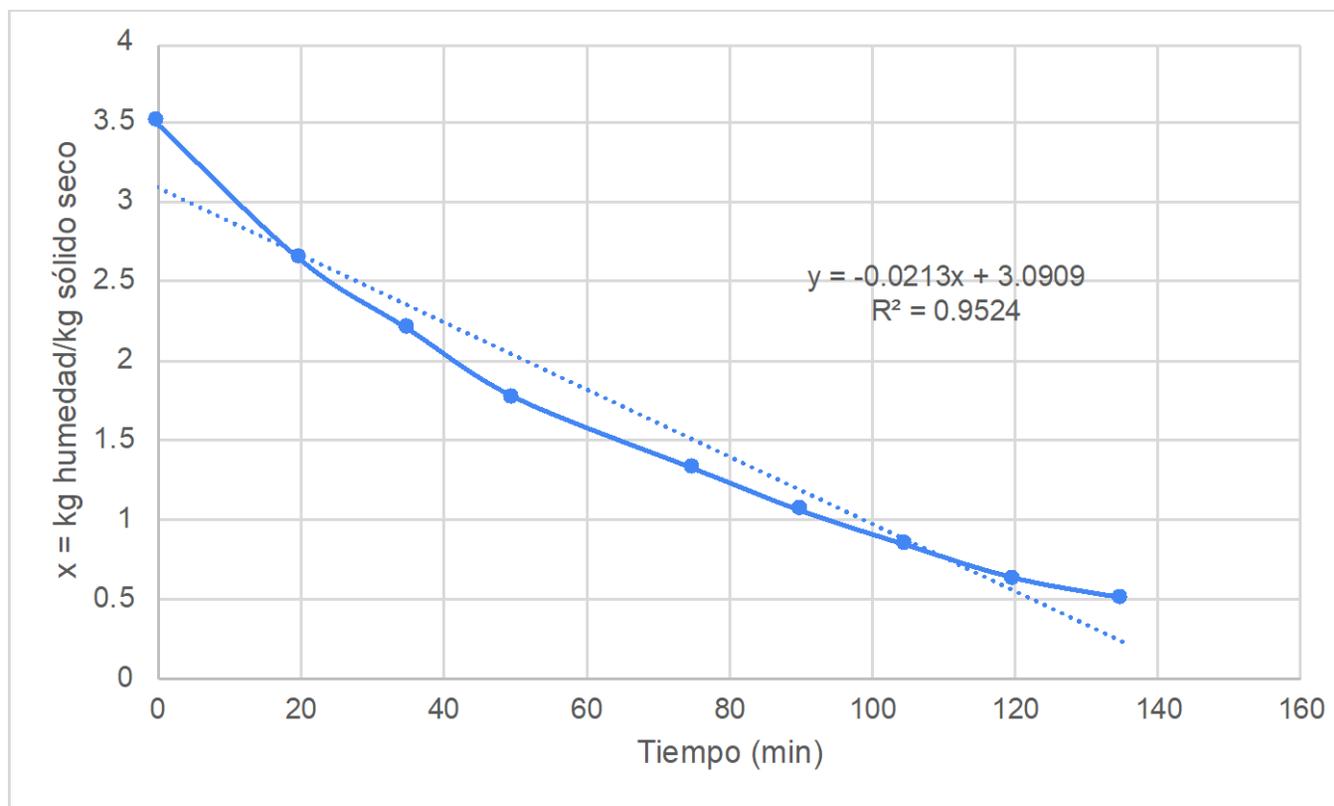
Figura 22. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua, teniendo así un flux final de 1.6039 x 10³ kg evaporados/m²·m·s.

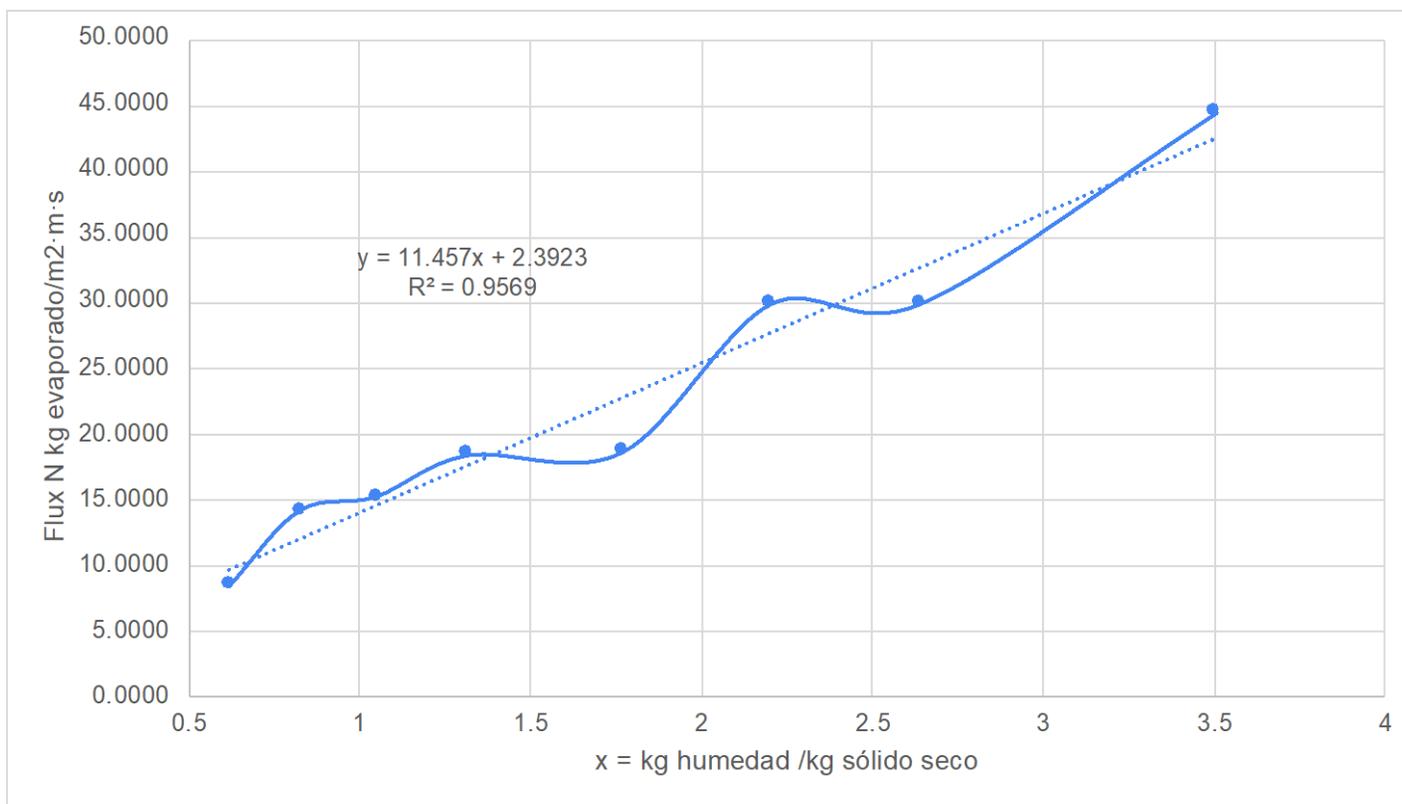
Figura 23. Curva de humedad en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 100 min, blanqueada por el método ECF y prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. A estas condiciones se llegó a a una humedad final de $49.88 \pm 0.64\%$ m/m en base seca, con un tiempo de secado de 135 minutos a 120 °C. Se tomo como peso de base seca 13.0771 ± 0.1 g.

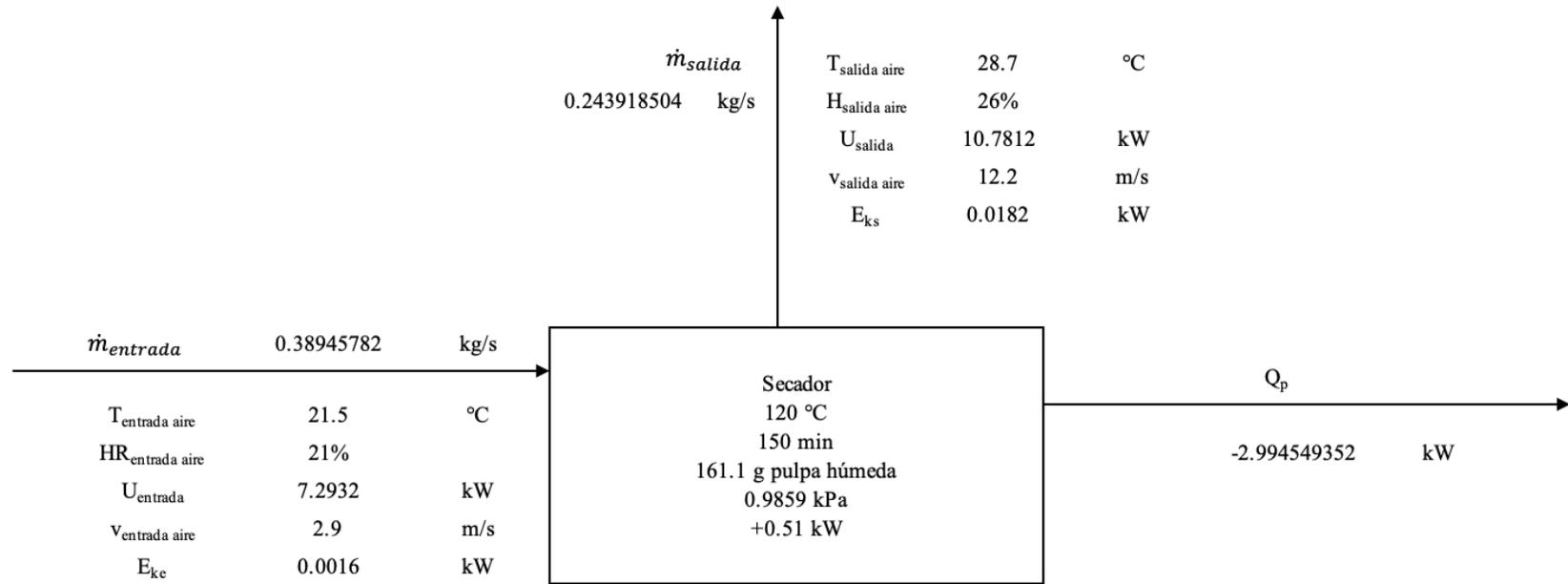
Figura 24. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 100 minutos, blanqueada por el método ECF y prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.01272 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

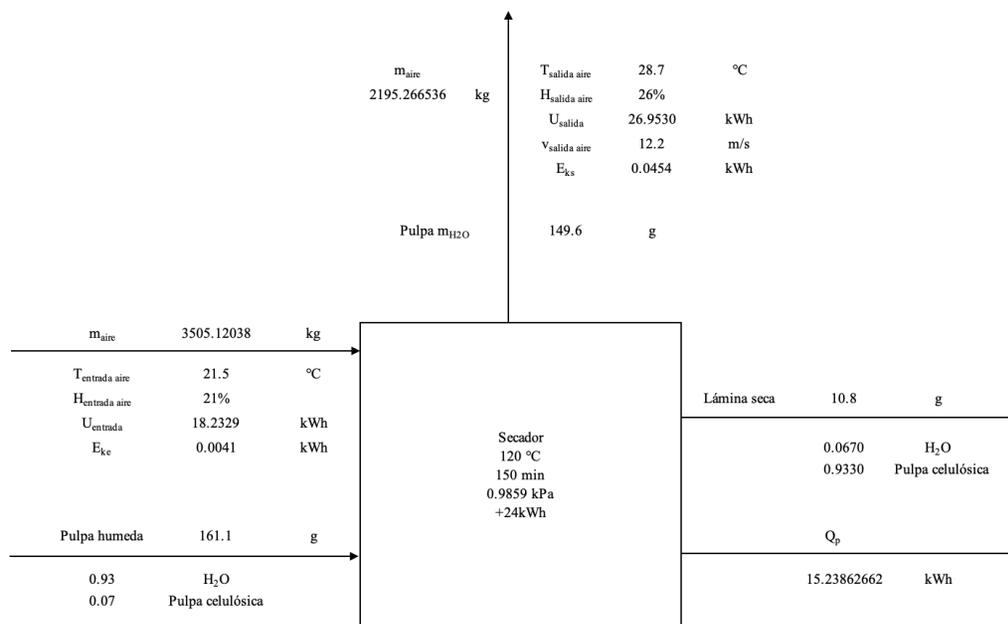
Figura 25. Balance de masa y energía instantáneo del proceso de secado por lotes



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el balance a partir de la pulpa tomada como base de cálculo siendo la deslignificada con una solución de 8% NaOH respecto al raquis por 100 minutos. Se tomó en cuenta el consumo eléctrico del equipo, así como el cambio de energía cinética por el ventilador y de energía interna por el cambio de entalpía debido a cambio de temperatura y humedad del aire. El tiempo total del proceso es de 180 minutos pues se consideran los 30 minutos destinados a la homogenización de calor en el equipo previo al secado de las muestras. La pulpa inicial tenía una humedad base seca de 14.9879 kg H₂O/kg sólido seco, y en la salida obtuvo la humedad en base seca de 7.18 ± 0.14% m/m.

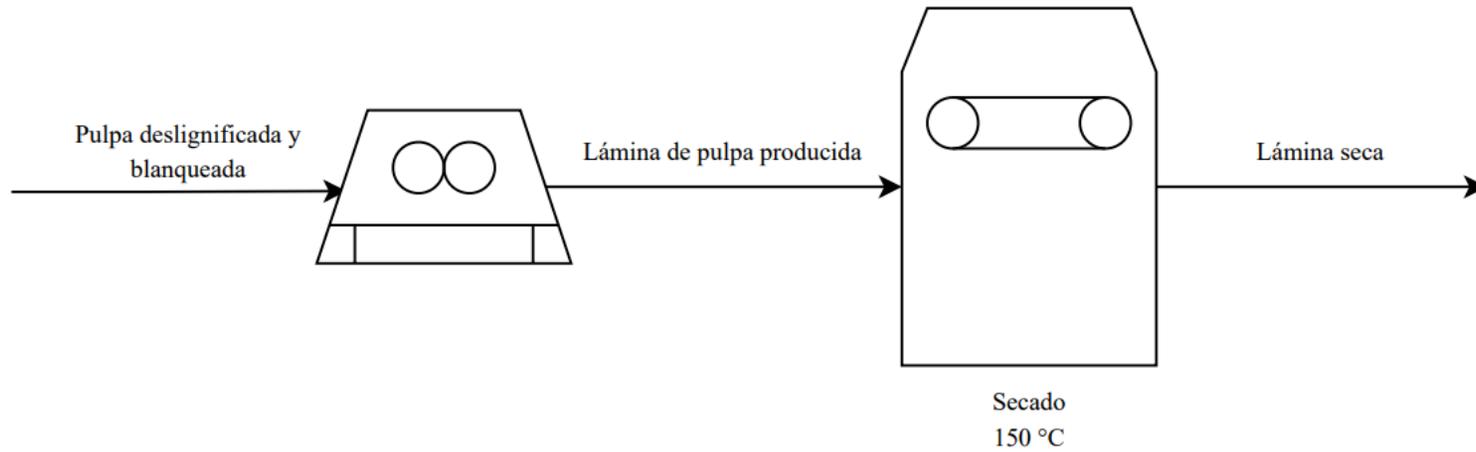
Figura 26. Balance de masa y energía del proceso total de secado por lotes



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el balance a partir de la pulpa tomada como base de cálculo siendo la deslignificada con una solución de 8% NaOH respecto al raquis por 100 minutos. Se tomó en cuenta el consumo eléctrico del equipo, así como el cambio de energía cinética por el ventilador y de energía interna por el cambio de entalpía debido a cambio de temperatura y humedad del aire. El tiempo total del proceso es de 180 minutos pues se consideran los 30 minutos destinados a la homogenización de calor en el equipo previo al secado de las muestras.

Figura 27. Diagrama de proceso de secado propuesto a nivel industrial



Fuente. Elaboración propia basado en el proceso a escala laboratorio.

Nota. En el presente diagrama se propone tener un proceso previo de laminado de la pulpa deslignificada y blanqueada con rodillos para tener un espesor homogéneo en todo el producto. Con esto se propone el secado de banda continua o el secador de rodillos.

Cuadro 20. Especificaciones de secadores propuestos a nivel industrial

Característica	Secador de banda	Secador de rodillos
Marca	GEM	Schaeffler Group
Modelo	Apron Dryer	FAG 566487K.C5
Capacidad de producción	200 – 2000 kg/h	1 m/min
Zonas de calentamiento	3	Dependiendo los rodillos instalados
Dimensiones	Ancho de 700 mm a 3250 mm Largo de 10000 mm a 45000 mm	Longitud de rodillos: 7,120 mm Diámetro rodillos: 1,150 mm
Fuente de energía	Combustibles como gas, vapor, fluido térmico. Electricidad	Vapor
Material de construcción	Acero inoxidable o acero dulce	Metal
Otras características	Integración de sistemas PLC y SCADA	Peso de rodillo: 200 kN Tensión de fieltro: 5 kN/m

Fuente. Elaboración propia basado en las especificaciones de los equipos seleccionados.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se buscó estudiar el proceso de laminado, prensado y secado de una pulpa celulósica a partir de raquis de plantaciones de banano. Esto se hizo para poder proponer información acerca de estos procesos, ya que no se tiene en la actualidad en el país. Para esto fue fundamental caracterizar la pulpa antes y después de los procesos sometidos, así como hacer las curvas de secado correspondientes para determinar tiempo y rapidez de secado.

Las muestras de pulpa previamente deslignificada y blanqueada fueron analizadas para poder comparar sus características iniciales con las finales. Es importante resaltar que para esta investigación se tomó como base de cálculo la muestra de la pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos, teniendo un peso original de 500 g previo al proceso de laminado con una humedad base húmeda promedio de 92.57% m/m. Se realizó la caracterización de más pulpas, en las cuales se tienen diferentes condiciones de deslignificación y diferentes métodos de blanqueo (ECF o TCF) como se puede ver desde el Cuadro 1 hasta el Cuadro 19.

La composición de la materia prima, siendo el raquis de banano, consta de una mezcla de varios polímeros, entre los cuales se encuentra lignina y celulosa. Este último es el que da la resistencia al papel, y su naturaleza demuestra que permite la formación de enlaces de hidrógeno, tanto como intramoleculares como intermoleculares, causando que con los enlaces se interactúe con el agua, dando lugar a la tendencia de absorber agua de la pulpa húmeda y ya seca. De igual forma, por esto se consideró la humedad ambiente durante el proceso, pues esta puede afectar a las muestras tratadas, cambiando su resistencia y humedad, es importante considerar este parámetro al momento de trabajar con este tipo de muestras y productos (Twede, Selke, Kamdem, & Shires, 2014). La deslignificación se realizó de manera adecuada, puesto que se realizó con hidróxido de sodio, siendo una hidrólisis alcalina que permitió tener un aumento en el área superficial interna, lo que lleva a una disminución de cristalinidad, una separación de las uniones estructurales de la lignina y por último un rompimiento de la misma. Este tipo de hidrólisis se basa en la saponificación de enlaces ésteres que unen la hemicelulosa y otros componentes, como lo es la lignina (Niño, Acosta, & Gelves, 2013). Por otro lado, el blanqueo de la pulpa también se realiza con hidróxido de sodio lo que refina la pasta pues aún se remueven residuos de lignina de la muestra. En el método ECF, siendo el que contiene cloro, este compuesto (dióxido de cloro) es agregado como un agente blanqueador selectivo que forma iones de cloruro a partir del cloro molecular usado para el blanqueo de la pulpa, mientras que los iones de clorato y el clorito no son usados para blanquear (Serrano, 2021). Con el método TCF, no se usaron compuestos de cloro, sino peróxido de hidrógeno siendo el oxidante, sin embargo la eficiencia se puede ver afectada por la presencia de metales por lo que es necesario la adición de aditivos como el silicato de sodio, utilizado en este caso estabilizador, lo que llevó a minimizar la catálisis de descomposición por los iones metálicos. El sulfato

de magnesio también fue utilizado para estabilizar el licor y reducir flóculos insolubles que se podían formar (Flores & Melo, 2007).

Fue importante considerar para el análisis de número kappa un barrido de una solución sin muestra para así establecer el punto de lectura de las absorbancias en las muestras, según los antecedentes, en el trabajo de Chai y Zhu (1999), se debía evaluar en donde se encontraba un pico en el barrido para así establecer la longitud de onda necesaria, llegando a la conclusión de realizar las lecturas en la longitud de 553 nm. Se realizó el método del espectrofotómetro, debido a que este se basa en el método convencional de TAPPI, proponiendo una expresión para la obtención del dato como se establece en la ecuación 1 partiendo de la absorbancia obtenida.

El proceso de prensado se vio afectado por la remoción de agua que se tiene en dicho proceso, en este caso se trabajó con la prensa hidráulica del laboratorio de operaciones unitarias, realizando una aplicación de presión de aproximadamente 8 toneladas métricas. Como se puede ver en la Figura 23, esta muestra llegó hasta un porcentaje de humedad de $33.28 \pm 0.34\%$ m/m en base húmeda, y humedad de $49.88 \pm 0.64\%$ m/m en base seca. Esto se pudo deber a que la humedad fue atrapada dentro de la muestra durante el momento de prensado, lo que no permitió que esta fuese removida. Sin embargo, teniendo este proceso previo al secado se tuvo un espesor más uniforme lo que permitió tener un producto con una mejor presentación. En este caso la humedad ligada fue afectada, ya que aunque fue removida en su inicio, se llegó a humedad de equilibrio con un alto valor como se puede ver en la Figura 23, pues se ve que se tiene ya un comportamiento constante en el que la muestra deja de ser comportarse como higroscópica.

Para el proceso de secado se utilizó un secador de bandejas por lo que este proceso debía realizarse por lotes. En este caso el aire fue el medio secante, este debía ser controlado según las condiciones del día, así como su humedad relativa. Los valores de la humedad relativa del ambiente variaron desde 35% a 80%. Se puede establecer que las condiciones del aire de secado son constantes durante todo el proceso dentro del equipo, debido a que la capacidad de este es mucho mayor a las muestras que eran introducidas. Con esto se pudo deducir que las condiciones del aire de secado fueron constantes durante todo el proceso. Las muestras fueron colocadas en forma de “zig-zag” para tener una distribución adecuada del medio secante sin afectar significativamente el proceso de secado de otras muestras. Fue necesario el uso de termocuplas para así garantizar que se tenía un proceso homogéneo, colocadas a tres alturas diferentes en ambos lados del secador, para así evaluar que el proceso estaba siendo realizado de manera correcta.

Como se puede observar en las curvas de secado, la experimentación concuerda con lo que se establece en la teoría teniendo sus fases establecidas según la rapidez de secado, teniendo como pendiente más pronunciada el movimiento producido por el secado interno de superficie de controles no saturada de humedad, según la Figura 1. Se llegó al equilibrio al tener en el último punto de estas curvas, siendo al humedad de equilibrio mostrada en las curvas de secado, pues en este momento la velocidad de secado es cercana a 0, lo que hace que ya no existe fuerza motriz para seguir con el proceso de remoción de materia. Conforme la fuerza motriz va disminuyendo, también lo hace el flux, teniendo una menor velocidad llegando al equilibrio. Por otro lado, como se puede ver en las curvas de pérdida de humedad de la muestra respecto al tiempo, esta tiene un inicio con una mayor pendiente debido a que la pérdida de humedad del inicio del proceso es mayor pues es toda el agua excedente que la muestra contiene. Debido a que se tiene un proceso a pequeña escala, la muestra queda con un alto porcentaje de humedad al iniciar el secado, teniendo un promedio de 85% m/m base húmeda, de humedad como se puede ver en el balance de masa del proceso, causando que el inicio del proceso de secado tenga como función remover esta agua en exceso para así permitir que el proceso de secado de la lámina se realice de forma correcta. En cuanto al balance de energía, se tiene un consumo eléctrico establecido por el equipo, que según la base de cálculo utilizada del proceso de secado fue de 150 minutos en el equipo a una temperatura de 120 °C, se tiene que se alimentan 24 kWh al equipo, teniendo la mayoría de energía dirigida a las resistencias del equipo y al proceso de calentamiento, asumiendo que se puede omitir la energía consumida por el ventilador.

Se realizaron diferentes pruebas de secado, variando las temperaturas del proceso para poder establecer las condiciones a utilizar en el proceso. En este caso se analizaron temperaturas de 90 °C hasta 120 °C, como se puede ver en las gráficas de anexos, teniendo una temperatura menor se requería más tiempo de secado y esto se justifica pues con la temperatura de 90 °C no se tiene una evaporación de agua considerablemente rápida, debido a que se necesita mayor temperatura para poder remover dicha humedad. Es importante resaltar que en este caso se trabajó con una velocidad constante de aire entrante al equipo por lo que las condiciones mencionadas pueden ser comparadas. De la misma manera, se puede ver en las gráficas de curvas de secado que teniendo un mayor porcentaje de humedad inicial dichas curvas son más pronunciadas. Se sabe que conforme se tiene un aumento de temperatura en el proceso de secado se tendrá un proceso más rápido, siendo esta la razón por la que se incrementó la temperatura llegando a considerar como temperatura adecuada 120°C. El proceso también pudo ser variado con la velocidad del medio secante o aumentando la humedad del aire para así disminuir la fuerza motriz, sin embargo son condiciones que no se variaron en el secador con el que fue trabajado.

A nivel industrial, según los resultados obtenidos se propone una búsqueda de equipo de secado continuo, pues el secador de bandejas a nivel industrial no es muy eficiente. De igual forma, en esta investigación se propone la formación de láminas por lo que es necesaria una prensa previa, que aparte de remover el exceso de agua funcione para tener un espesor homogéneo de la muestra y así tener una mejor calidad del producto. Para esto también se podría analizar el uso de un secador de rodillos, sin embargo es importante considerar que el uso de este pueda necesitar más de una pasada por los rodillos, para así simular un proceso de calandrado, permitiendo mantener el espesor y llegar a la humedad correspondiente. Por otro lado, se puede trabajar con secadores continuos de banda, permitiendo tener el tiempo necesario de contacto para el intercambio de masa y calor, controlado por la velocidad y largo de la banda. Para esta última propuesta se debe considerar remover aproximadamente 50% de la humedad antes de iniciar el proceso de secado, esto para que no sea tan largo, y se pueda hacer por medio del prensado, moldeado o succión según el tipo de producto a realizar. Como se puede ver en las curvas de secado según el marco utilizado, cambiaba su área superficial de contacto lo que permitía tener una mayor velocidad de secado, lo que puede ser información útil al momento de querer realizar un producto con aplicación comercial.

En cuanto a las características cualitativas que se podían observar de las láminas y muestras secadas, se pudo determinar que si estas eran prensadas no se tenía cambio de apariencia significativo, las dimensiones se conservaban en su mayoría sin presentar deformación alguna en los bordes de la muestra. Por otro lado, las láminas sí se vieron afectadas, pues se pudo observar en los cuadros 1 y 2, que los espesores de estas si fueron reducidos en aproximadamente 42%. De igual forma estas si se vieron afectadas con deformaciones que no afectaron la calidad, pero si la presentación del producto, lo que se debe evaluar al momento de querer ya tener una presentación en el mercado.

En la presente investigación también se realizaron las pruebas para realizar embalajes de huevo a partir de la pulpa deslignificada, y durante estas pruebas se pudo demostrar que el uso de un secador de banda es viable para estos procesos, sin embargo se tenía la formación del molde por succión removiendo más del 50% de humedad, lo que permitió que el proceso de secado fuese de tan solo 20 minutos, a un rango de temperaturas entre 140 °C y 160 °C. Es importante resaltar que durante este proceso se agregaron aditivos los cuales fueron brindados por la empresa que prestó los equipos para estas pruebas, lo que ayudó a que el producto final tuviese una mejor resistencia y no se viera afectado por el contacto que podía tener con agua. Con esto se pudo establecer que el uso de dichos componentes pueden ayudar a la viabilidad de la aplicación comercial del producto, permitiendo cumplir con las características que el mercado actual busca. Es importante analizar que tipo de aditivo es agregado, ya que se debe considerar que se trata de fibras de celulosa que pueden ser afectadas de manera negativa si este no se agrega a la proporción y con las propiedades necesarias. Por otro lado en este proceso, se debe analizar la proporción de agua que es utilizada al momento de formar la pasta, pues con esta proporción en este caso se determina el grosor del producto. Si se agrega una menor cantidad de agua, se tiene una mezcla más densa de la pulpa lo que afecta en el peso final del producto, y si se agrega

una mayor cantidad de agua, cambiando la relación ideal que en esta acaso es de 4:1, siendo cuatro partes de agua y una de pulpa, se tiene un producto de bajo peso. Esto último no es malo si no se afecta la resistencia del producto, ya que con la misma cantidad de materia prima se podría hacer una mayor cantidad de producto.

Por otro lado, el uso de aditivos debe ser considerado según la finalidad del producto, pues como se ve en la presente investigación si no se agrega aditivos el producto puede desintegrarse en un menor tiempo por lo que si se busca un producto de embalaje que sea amigable con el ambiente no hay necesidad de estos aditivos, pues aunque el producto sea descartado en el lugar que no corresponde, este se desintegrará en poco tiempo. Pero, si lo que se busca es darle una mayor resistencia al producto en cuanto a la absorción del agua se pueden usar aditivos como lo son *Michelman Coating X300*, puesto que aplicado a la industria este nos da la propiedad de resistencia al agua.

Tomando en cuenta la aplicación comercial fue importante no solo tomar en cuenta el producto final sino también considerar su costo de producción para evaluar su viabilidad en el mercado. El costo unitario de un cartón para embalaje de huevo actual es de aproximadamente Q0.54, considerando que el 60% del costo es el consumo de gas propano para el horno según las pruebas realizadas en este trabajo. Para el costo del embalaje a partir de la pulpa de tomaron en cuenta solamente las etapas de deslignificación y secado, pues el proceso de blanqueo no fue necesario para obtener las características de color deseadas, pues el color sí fue absorbido de manera correcta con la pulpa; de igual forma, se obvia esta parte para reducir el impacto ambiental por los químicos agregados para el blanqueo y el consumo energético por la cocción de la pulpa. Tomando en cuenta lo mencionado, se obtuvo un costo unitario de Q0.80 por cartón, esto significa que el costo con esta aplicación es mayor, sin embargo no es tan significativo, por lo que se puede proponer la viabilidad comercial si el cliente final está dispuesto a pagar un poco más por el valor agregado de este producto, pues se recomienda que al comercializarlo se ponga un diferenciador que haga saber que el producto está hecho a partir de un desecho agrícola para motivar su compra. Este diferenciador puede ser una sticker que ayude a su venta.

En este caso se pueden comparar los procesos de secados de las láminas desarrolladas y de las muestras que fueron prensadas, permitiendo establecer que según las condiciones establecidas y a las que fueron trabajadas las muestras, se obtuvo una mayor remoción de humedad cuando la pulpa no fue prensada. De igual forma, se puede ver en la Figura 23 que la humedad de la pulpa prensada ya no podía seguir siendo removida, ya que en el intervalo de tiempo evaluado no se tenía una diferencia significativa, por lo que el proceso de secado llegaba a su fin.

En cuanto a los secadores propuestos, es importante considerar la aplicación que se le va a dar a los productos o el tipo de materia prima que se va a ingresar al equipo. Considerando este proceso, con láminas de pulpa celulósica, se propone antes de ingresar al equipo realizar el modelado adecuado con un equipo de rodillos que permitan remover el exceso de agua y así el proceso de secado requiera menor tiempo. Con esto propuesto, se consideró el secador de banda continua marca Gem, el cual puede ser utilizado por fibras, entre otras aplicaciones, es un equipo estructurado con paneles aislados en los lados para así tener una menor pérdida de calor. La capacidad de este equipo depende del producto a utilizar establece el fabricante, sin embargo lo que se debe considerar en esta investigación es que se busca llegar a una humedad base húmeda entre 3% y 10% m/m. También como se menciona anteriormente, se debe conocer el tiempo de residencia del producto que en el caso actual es de 150 minutos, en el escenario de la base de cálculo. Es importante mencionar que este tiempo disminuye según la humedad de entrada del producto, como se ve con las curvas del proceso de muestra prensada, por lo cual si se realiza un proceso previo con rodillos, el tiempo de residencia en este equipo será menor. Este equipo cuenta con flexibilidad lo que permite tener una salida adecuada de cualquier producto tratado teniendo un proceso eficiente. Es importante mencionar que este equipo también cuenta con los aspectos de control e instrumentación, teniendo un sistema completo de PLC y sistema SCADA para minimizar el error humano y monitores de temperatura en cada zona del equipo, lo que permite tener un mejor control y asegurar la calidad del producto. Por último este equipo puede ser organizado según las necesidades del proceso, según la experimentación con los embalajes de huevo, dos pasos de este equipo eran adecuados, sin embargo este puede ser modificado desde uno a tres pasos teniendo siempre diferentes zonas de calentamiento. Esto lo hace viable para un proceso ya a nivel industrial teniendo una mayor escala de producción, ajustando el tiempo de secado según la calidad del producto obtenido.

Asimismo, según la investigación realizada también se puede utilizar a nivel industrial un secador de rodillo, sin embargo, se debe tomar en cuenta que lo que se busca con este equipo es simular un proceso de calandrado, por lo que si en la industria es posible este proceso mencionado, se puede tener un mejor desarrollo del producto, pues es la forma convencional de la realización de papel o láminas de cartón. La empresa Schaeffler Group, cuenta con diferentes diámetros de rodillos para rodamientos en la industria del papel, los que pueden ser utilizados en esta investigación. En este caso se llega a los cilindros secadores, los cuales, como se establece previamente, se pueden trabajar a una temperatura mayor de los 100 °C. El fabricante menciona que los rodillos son colocados según la necesidad del cliente, por lo que se propone si se tiene una futura investigación analizar este proceso para la fabricación de láminas y el secado de las mismas. La temperatura que utilizan para el calentamiento del equipo es de 165 °C y una presión de 7 bar. Y como ya se tiene una menor humedad en el producto, la sección de secado puede ser de 105 °C. Por último, se debe conocer el diámetro del cilindro, ya que según lo estudiado, se le debe dar más contacto a la lámina en el cilindro si la humedad es mayor a la que se busca para trabajar; y si el papel o cartón viene con una humedad baja se le debe colocar menor contacto con el cilindro de secado, siendo este el proceso actual que se utiliza en la industria de Guatemala.

Comparando los parámetros evaluados de la pulpa previo a estos procesos y posterior a ellos, se puede ver que los cambios no son significativos a excepción del espesor de las láminas. Esto justifica que son procesos físicos como tal, evitando modificar la composición de la materia prima, permitiendo que se conserven la mayoría de sus características, y aun así tener la consistencia y presentación para poder ser aplicados a un uso comercial posterior.

Entre las principales fuentes de error de esta investigación se encuentra la toma de peso de las muestras en los intervalos de tiempo para la realización de las curvas de secado. Abrir y cerrar el secador pudo afectar la temperatura del proceso, afectando las condiciones establecidas para el secado de la muestra. De igual forma, se debe considerar la desviación estándar de los promedios obtenidos de los diferentes parámetros, así como la incertidumbre de la cristalería y equipos utilizados para las mediciones y obtención de resultados.

IX. CONCLUSIONES

- La lámina de pulpa previamente deslignificada y blanqueada proveniente de raquis de banano, con un espesor promedio de 2.971 ± 0.001 mm, requiere un tiempo aproximado de secado de 180 minutos, en un rango de temperatura de 110 °C a 130 °C en un secador de bandejas para tener una humedad base húmeda entre 3% y 10% m/m final, según las curvas de secado de los procesos realizados durante la presente investigación.
- Se puede establecer que debido a que no hay cambio significativo de pH manteniendo valores cercanos a 9; de densidad, entre 0.996-0.998 g/mL y número Kappa, entre 34 y 39, de la pulpa previa y posterior al proceso de laminado y secado, estos procesos no afectan la cantidad de lignina y otros compuestos que se tiene el producto.
- Se determinó que las láminas que tenían un espesor inicial de 5.055 ± 0.001 mm promedio, tienen una reducción aproximada de 2.083 ± 0.001 mm de este, debido al proceso de secado, en el que pierden alrededor de $91.58 \pm 0.92\%$ m/m de humedad en base húmeda.
- La pulpa previamente prensada quedó con un mayor porcentaje de humedad, siendo de $33.28 \pm 0.34\%$ m/m base húmeda pues esta se ve afectada por el proceso mecánico previo, que aumentó la resistencia, pero no permitió que mucha agua fuese evaporada causando que esta quedara en el centro de la muestra final; de igual forma, se puede ver en el Cuadro 17, que el gramaje también aumentó por tener una mayor cantidad de muestra en una menor área superficial.
- Para un proceso industrial se propone un secador de banda, pues con este se puede controlar el tiempo de contacto que tiene la muestra con el medio secante según las necesidades del proceso, asimismo, se propone incorporar un equipo para el prensado previo de la muestra para así remover el exceso de agua y que este no necesite gasto de energía extra en dicha remoción.
- El uso de aditivos depende de la finalidad del producto, si se requiere que tenga resistencia al agua se puede evaluar el uso de aditivos como *Michelman Coating X300*, y si se busca un producto que sea biodegradable no se recomienda el uso de aditivos para evitar agregar compuestos químicos al producto.
- Se propone la viabilidad de aplicación comercial pues el costo unitario de la muestra realizada, siendo los cartones de embalaje de huevo, es de Q0.80 teniendo un costo superior por aproximadamente Q0.30 al embalaje actual, siendo esta diferencia el valor agregado por la materia prima utilizada para su producción.

X. RECOMENDACIONES

- Usar un rodillo prensa para la elaboración de las láminas, para así poder obtener un producto más homogéneo con respecto al espesor de estas, pudiendo graduar la medida deseada, y así permitir tener un mejor proceso de laminado y secado.
- Determinar el rango del tamaño ideal de la fibra de la pulpa celulósica que se debe utilizar para el proceso de producción de las láminas para así tener una mejor calidad del producto final.
- No humedecer la pulpa después del proceso de blanqueado, para así evitar agregar más agua a la muestra y que este exceso afecte el proceso de secado de esta, para así permitir tener una menor humedad de entrada al proceso y requerir un menor tiempo en el equipo, significando un ahorro energético del proceso.
- Realizar el proceso de secado en otro tipo de secador, para así evaluar tanto como las características cualitativas como los parámetros analizados en esta investigación, y así establecer cual tiene un mejor desempeño para este proceso.
- Realizar el presente estudio para otras materias primas provenientes de desechos agrícolas para evaluar su comportamiento en los procesos realizados y proponer nuevos productos a partir de estas como alternativas a productos comerciales actuales.
- Agregar un aditivo que permita al producto tener una mejor resistencia y no absorba tanta agua al momento de estar seco para así permitir su aplicación comercial en casos donde se necesite dicha característica, como lo fue con el embalaje de los huevos en esta investigación.
- Se recomienda obviar el blanqueo para la producción de productos de embalaje para reducir los desechos del proceso y tener ahorros económicos. De igual forma se propone evaluar la cantidad de veces que el licor de la etapa de deslignificado puede ser reutilizado por el contenido de hidróxido de sodio y si es posible quitar la lignina de este.
- Evaluar posibles certificaciones que se le pueden dar a los productos realizados a partir de desechos agrícolas como el raquis de banano, que genere un valor agregado y motive al público a adquirir este tipo de empaques o productos; proponiendo tener una calcomanía o sello que resalte el origen de los mismo diciendo “de raquis de banano” o la materia prima utilizada.

- Analizar la aplicación de esta materia prima para la realización de otros productos como materiales de empaque, por ejemplo, el embalaje de fruta como manzanas o melones, y evaluar la aplicación de láminas para la realización de cajas para transportar diversos productos.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Altamirano, M. (2010). *Pulpa Kraft con Acer Pseudoplatanus*. Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/fifa465p/doc/fifa465p.pdf>

AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis*. Maryland: AOAC International.

Cabrera, V. (2017). *Proceso de secado*. Universidad de Las Américas de Puebla. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf

Chai, X. S., & Zhu, J. Y. (1999). *Rapid Pulp Kappa Number Determination Using Spectrophotometry*, 25(11). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/27521195_Rapid_Pulp_Kappa_Number_Determination_Using_Spectrophotometry

Çengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. 1ª edición, McGraw-Hill. Tabla A-9.

Emerson Climate Technologies. (2009). *Capítulo 13. Psicrometría*. Recuperado de <https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad3.pdf>

Flores, G., & Melo, R. (2007). *Blanqueo de pulpas de alto rendimiento con peróxido a presión*. Universidad de Concepción. Recuperado de http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/07_RM.pdf

GABP Ingeniería. (2016). *Prensas*. Recuperado de: <https://gabpingenieria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/prensas.pdf>

GEM. (2020). *Effective and affordable drying solutions*. Recuperado de <https://www.gemdryers.com/wp-content/uploads/2020/07/Band-Dryer-Catalog-2.pdf>

Hoyos, J., Jaramillo, P., Giraldo, A., Dufour, D., Sanchez, T., & Lucas, J. (2012). *Caracterización física, morfológica y evaluación de las curvas de empastamiento de musáceas*. Scielo, 214-229.

Instituto Nacional de Estadística de Guatemala. (2018). *Estadísticas Agropecuarias*. Recuperado de <https://www.ine.gob.gt/ine/estadisticas-agropecuarias/>

Jiguan, B. (2019, 24 marzo). *Guatemala es el tercer exportador de banano*. Recuperado de <https://dca.gob.gt/noticias-guatemala-diario-centro-america/guatemala-es-el-tercer-exportador-de-banano/>

Jiménez, H. (2014). *Aspectos ambientales y buenas prácticas de manufactura para una empresa de banano*. Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Ludwig, J. (2019). *Aprovechamiento del residuo de pinzote del cultivo de banano para la obtención de pulpa de papel*. Universidad Nacional de Piura. Perú.

Martines, E., & Lira, L. (2010). *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos*. Simposio de Meteorología. México. Recuperado de <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en la ingeniería química*. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education.

Mettler Toledo. (2020). *Medición de la densidad*. Recuperado de Aplicaciones Pesaje en el Laboratorio: https://www.mt.com/es/es/home/applications/Laboratory_weighing/density-measurement.html

Michelman. (2020). *Coating X300TM AF* -. <https://www.michelman.com/solutions/coating-x300/coating-x300-tm-af/>

Niño, L., Acosta, A., & Gelves, R. (2013). *Evaluación de pretratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (Manihot esculenta Crantz)*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 69, 317–236. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/430/43029812024.pdf>

Ohaus. (2018). *Manual de instrucciones MB 120 Analizador de Humedad*. New Jersey: Ohaus Corporation.

Pragma Automation. (2021, 18 mayo). *PLC - Programmable Logic Controller*. Recuperado de <https://pragma-a.com/automatizacion/plc/>

Schaeffler Group. (2018). *Rodamientos para la industria del papel*. Recuperado de https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/publication/downloads_18/wl_13103_2_es_es.pdf

Serrano, L. (2021). *Evaluación de decoloración en pulpa celulósica deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo ECF y TCF*. Universidad del Valle de Guatemala.

TAPPI. (2006). *Hydrogen ion concentration (pH) of paper extracts (cold extraction method) (Proposed reaffirmation of T 509 om-02)*. Standard Specific Interest Group.

TAPPI. (2007). *Ring crush of paperboard (rigid support method) T 822*. Standard Specific Interest Group.

Treybal, R. E., & Rodríguez, A. G. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education.

Twede, D., PhD, Selke, S. E. M., PhD, Kamdem, D., PhD, & Shires, D. (2014). *Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging Technology* (2.a ed.). Pennsylvania, Estados Unidos: Destech Pubns Inc.

X-Rite. (2002). *Entender la guía de color*. Recuperado de https://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001_Understand_Color_es.pdf

Zelada, L. (2021). *Evaluación de deslignificación de raquis de banano para la elaboración de pasta celulósica*. Universidad del Valle de Guatemala.

XII. ANEXOS

A. DATOS DE PLACA

Cuadro 21. Especificaciones de secador de bandejas

Característica	Valor
Marca	Corbett Industries Inc.
Tipo	Secador de bandejas
Modelo	EC-404-6
Número de serie	12805
Voltaje	220 V
Frecuencia	60 Hz
Amperaje	120.2 A
Ventilador de escape	225 CFM
Motor	1.0 HP

Nota. Se trabajó con el secador de bandejas que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para remover la humedad de las láminas desarrolladas y así realizar las curvas de secado correspondientes.

Cuadro 22. Especificaciones de prensa hidráulica

Característica	Valor
Marca	Carver
Modelo	3912
Rango de presiones	0 – 11 toneladas métricas
Máximo golpe de pistón	5 1/8"

Nota. Se trabajó con la prensa hidráulica que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para tener las muestras prensadas previamente al secado.

Cuadro 23. Especificaciones de balanza de humedad

Característica	Valor
Marca	Ohaus
Modelo	MB 120
Número de serie	B605071576
Voltaje	120V AC o 240V AC
Frecuencia	60 Hz
Corriente	5 A
Muestra mínima	0.500 g
Muestra máxima	120 g
Precisión	0.001 g

Nota. Se utilizó la balanza de humedad que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para determinar la humedad de las muestras trabajadas.

Cuadro 24. Especificaciones de la balanza

Característica	Valor
Marca	Ohaus
Modelo	V31XH2
Número de serie	B652517672
Voltaje	120V AC
Frecuencia	60 Hz
Corriente	0.5 A
Rango de temperatura	0 – 40 °C
Muestra máxima	2000 g
Precisión	0.1 g

Nota. Se utilizó la balanza que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para realizar las mediciones de peso de las muestras a trabajar, como de las láminas que iban siendo secadas en función del tiempo para la construcción de las curvas de secado por diferencial de peso.

Cuadro 25. Especificaciones de potenciómetro

Característica	Valor
Marca	Oakton
Modelo	PCSTestr 32 – Multi Parameter
Rango de pH	0 – 14
Precisión pH	0.01
Rango de temperatura	0 – 50 °C
Baterías	4 x AA

Nota. Se utilizó el potenciómetro que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para las mediciones de pH de las muestras previa y posteriormente del secado.

Cuadro 26. Especificaciones de micrómetro digital

Característica	Valor
Marca	Beslands
Modelo	Model 0-25 mm
Rango de operación	0 – 25 mm
Precisión	0.001 mm
Rango de temperatura de operación	0 – 40 °C
Humedad de operación	≤80%
Batería	CR2032 litio

Nota. Con el micrómetro se realizaron las mediciones de espesor de las láminas previa y posteriormente al proceso de secado.

Cuadro 27. Especificaciones de espectrofotómetro

Característica	Valor
Marca	PerkinElmer Instruments
Modelo	Lambda 35 UV/VIS Spectrometer
Serie	101N2011603
Rango de onda	190 – 1100 nm
Ancho de banda	0.5 – 4 (variable)
Rango de absorbancia	3.2 A

Nota. Se utilizó el espectrofotómetro para la lectura de absorbancia de las muestras en la longitud de onda de 553 nm.

Cuadro 28. Especificaciones de indicador de temperatura

Característica	Valor
Marca	Extech Instruments
Modelo	TM 25
Rango de temperatura	-40 °C – 200 °C
Precisión	1 °C
Material sonda de penetración	Acero inoxidable
Largo sonda de penetración	105 mm

Nota. Se utilizó el indicador de temperatura para controlar este parámetro en diferentes puntos del secador de bandejas para evaluar su homogeneidad al momento de secado.

Cuadro 29. Especificaciones de Densitómetro

Característica	Valor
Marca	X-Rite Pantone
Modelo	Exact Basic
Rango de gráfico	0 – 100%
Rango espectral	400 a 700 nm
Precisión espectral	10 nm
Fuente de luz	Lámpara de tungsteno en gas inerte y LED UV.

Nota. Con este equipo se realizaron las mediciones de los parámetros de color de la pulpa ya seca, obteniendo los parámetros CIELAB.

Cuadro 30. Especificaciones de balanza analítica

Característica	Valor
Marca	Ohaus
Modelo	PA114
Serie	Pioneer
Voltaje	8-14.5V
Frecuencia	50/60 Hz
Capacidad máxima	110 g
Precisión	0.0001 g

Nota. Se utilizó la balanza analítica que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para realizar las mediciones de las muestras a trabajar.

Cuadro 31. Especificaciones de higrómetro

Característica	Valor
Marca	Extech Instruments
Modelo	IR Thermometer & Humidity Meter RH101
Rango de humedad	10% - 95%
Precisión humedad	3.5%
Rango temperatura de aire	-20 °C – 60 °C
Precisión temperatura aire	± 2 °C

Nota. Se utilizó el higrómetro para obtener las condiciones de entrada y salida del aire en el secador y así poder determinar los parámetros necesarios con la carta psicrométrica para realizar el balance de energía.

Cuadro 32. Especificaciones de anemómetro

Característica	Valor
Marca	The art of measurment
Modelo	AE58780
Rango	0 – 30 m/s
Precisión	± 5%

Nota. Se utilizó el anemómetro para determinar las velocidades del aire de la entrada y la salida del secador, para poder determinar su flujo másico.

B. REACTIVOS QUÍMICOS

Cuadro 33. Especificaciones de ácido sulfúrico utilizado

Nombre del reactivo	Ácido Sulfúrico
Fórmula química	H ₂ SO ₄
Marca	Merck
Pureza	95-97%
Masa molar	98.07 g/mol

Nota. El ácido sulfúrico fue utilizado para la lectura de número Kappa de la muestra en el espectrofotómetro UV/VIS.

Cuadro 34. Especificaciones de permanganato de potasio utilizado

Nombre del reactivo	Permanganato de potasio
Fórmula química	KMnO ₄
Marca	Merck
Pureza	99%
Masa molar	158.03 g/mol

Nota. El permanganato de potasio fue utilizado para la lectura de número Kappa de la muestra en el espectrofotómetro UV/VIS.

C. DATOS ORIGINALES

Cuadro 35. Condiciones de operación durante la realización de la presente investigación

Aspecto	Valor
Temperatura	20 – 24 °C
Presión	0.969211 – 1.00263 atm

Nota. Estos son las condiciones a las que se trabajó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, durante toda la investigación realizada.

Cuadro 36. Propiedades de aire seco a la presión atmosférica

Aspecto	Valor
Temperatura	22 °C
Volumen específico	0.8302 m ³ /kg
Densidad	1.2044 kg/m ³
Entalpía	9.1228 kcal/kg
	38.1698 kJ/kg

Nota. Propiedades del aire según carta psicrométrica.

Cuadro 37. Medidas de marcos utilizados para el laminado de las muestras

Marco	Parámetro	
	Ancho (± 0.0005 m)	Largo (± 0.0005 m)
Pequeño	0.135	0.316
Mediano	0.300	0.400
Grande	0.550	0.750

Nota. Estas son las medidas de los tres tipos de marcos utilizados para realizar el laminado de las muestras. Si se tenía la muestra prensada se debían tomar las medidas.

Cuadro 38. Espesor de muestra deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por método ECF antes y después del proceso de secado

Punto	Espesor (mm)	
	Previo al secado	Después del secado
1	4.455	3.086
2	4.734	3.146
3	4.492	3.067
4	4.672	2.976
5	4.576	2.946
Promedio	4.586	3.044
Desviación estándar	0.118	0.082

Nota. Se midieron cinco diferentes puntos de la lámina para así obtener un espesor promedio, procurando que el espesor estuviese homogéneo.

Cuadro 39. Espesor de muestra deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por método TCF antes y después del proceso de secado

Punto	Espesor (mm)	
	Previo al secado	Después del secado
1	5.278	3.078
2	5.473	3.168
3	5.146	3.016
4	5.243	2.973
5	5.137	2.762
Promedio	5.255	2.999
Desviación estándar	0.136	0.152

Nota. Se midieron cinco diferentes puntos de la lámina para así obtener un espesor promedio, procurando que el espesor estuviese homogéneo.

Cuadro 40. Absorbancia de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF para Número Kappa, antes del proceso de secado

Concentración de hidróxido para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Masa (g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)			Número Kappa			Número Kappa promedio
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8	100	0.10061	1.8197	1.1676	1.8464	0.5452	0.5221	0.5506	27.1179	28.0746	26.8943	27.3623
	130	0.10028	1.7894	1.7098	1.7681	0.2104	0.2061	0.2013	41.1182	41.2969	41.4963	41.3038
	150	0.10298	1.6049	1.6031	1.6076	0.2972	0.1892	0.313	36.5281	40.8979	35.8888	37.7716
10	100	0.10108	1.2794	1.2976	1.2647	0.3921	0.3091	0.3812	33.3028	36.7242	33.7521	34.5931
	130	0.10149	1.3498	1.3046	1.3187	0.3761	0.3394	0.384	33.8252	35.3319	33.5008	34.2193

Fuente. Elaboración propia con datos recabados de espectrofotómetro.

Nota. Se realizó triplicado de las lecturas teniendo tres números kappa por muestra, y se realizó un promedio de estos, por cada muestra se realizaron dos mediciones, una al inicio de la mezcla de la pulpa con la solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico y la otra, diez minutos después de agitación constante.

Cuadro 41. Absorbancia de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF para Número Kappa, antes del proceso de secado

Concentración de hidróxido para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Masa (g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)			Número Kappa			Número Kappa promedio
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8	100	0.10525	1.3497	1.3045	1.3451	0.3807	0.3691	0.3796	32.4347	32.8939	32.4782	32.6023
	130	0.10206	1.2843	1.2641	2.7940	0.1321	0.1041	0.1131	43.5977	44.7408	44.3734	44.2373
	150	0.10370	1.1034	1.1003	1.1975	0.1908	0.1429	0.2014	40.5497	42.4743	40.1238	41.0492
10	100	0.10306	1.2106	1.2031	1.2098	0.2443	0.2037	0.2956	38.6385	40.2799	36.5645	38.4943
	130	0.10369	1.0067	1.0461	1.0875	0.2685	0.2103	0.2531	37.4313	39.7700	38.0501	38.4171

Fuente. Elaboración propia con datos recabados de espectrofotómetro.

Nota. Se realizó triplicado de las lecturas teniendo tres números kappa por muestra, y se realizó un promedio de estos, por cada muestra se realizaron dos mediciones, una al inicio de la mezcla de la pulpa con la solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico y la otra, diez minutos después de agitación constante.

Cuadro 42. Absorbancia de lámina seca, utilizando pulpa blanqueada por método ECF para Número Kappa

Concentración de hidróxido para deslignificación (%)	Tiempo de deslignificación (min)	Masa (g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)			Número Kappa			Número Kappa promedio
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8	100	0.10025	1.1638	1.1587	1.1502	0.5444	0.5211	0.5146	27.2485	28.2170	28.4871	27.9842
	130	0.10480	1.013	1.0961	1.0923	0.1994	0.2023	0.1867	39.7821	39.6668	40.2871	39.9120
	150	0.10903	1.0683	1.0583	1.0524	0.277	0.1978	0.1657	35.2732	38.2999	39.5266	37.6999
10	100	0.10078	0.9596	0.955	0.9477	0.3723	0.3629	0.3490	34.2206	34.6092	35.1839	34.6712
	130	0.10421	0.9135	0.9065	0.9013	0.3597	0.3386	0.3325	33.5980	34.4417	34.6856	34.2418

Fuente. Elaboración propia con datos recabados de espectrofotómetro.

Nota. Se realizó triplicado de las lecturas teniendo tres números kappa por muestra, y se realizó un promedio de estos, por cada muestra se realizaron dos mediciones, una al inicio de la mezcla de la pulpa con la solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico y la otra, diez minutos después de agitación constante.

Cuadro 43. Absorbancia de lámina seca, utilizando pulpa blanqueada por método TCF para Número Kappa

Concentración de hidróxido para designificación (%)	Tiempo de designificación (min)	Masa (g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)			Número Kappa			Número Kappa promedio
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8	100	0.10427	1.0576	1.0436	1.0416	0.3896	0.376	0.3676	32.3839	32.9273	33.2630	32.8581
	130	0.10073	1.0767	1.0975	1.1031	0.1239	0.1182	0.1201	44.5126	44.7483	44.6697	44.6435
	150	0.10465	1.0426	1.0346	1.0671	0.2091	0.1268	0.1548	39.4529	42.7297	41.6149	41.2659
10	100	0.10597	1.0317	1.0091	1.0073	0.2319	0.1928	0.2166	38.0650	39.6024	38.6666	38.7780
	130	0.10045	1.0021	1.0034	1.0015	0.2891	0.2081	0.2835	37.7841	41.1440	38.0164	38.9815

Fuente. Elaboración propia con datos recabados de espectrofotómetro.

Nota. Se realizó triplicado de las lecturas teniendo tres números kappa por muestra, y se realizó un promedio de estos, por cada muestra se realizaron dos mediciones, una al inicio de la mezcla de la pulpa con la solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico y la otra, diez minutos después de agitación constante.

Cuadro 44. Parámetros de color CIELAB de muestras analizadas

Muestra			Parámetros CIELAB			Reflejo (%)	
Método de blanqueo	Porcentaje de designificación (%)	Tiempo de designificación (min)	L	a*	b*		
ECF	8	100	77.1	-1.3	12.35	19%	
		130	77.4	-1.41	12.88	19%	
		150	75.7	2.19	21.76	17%	
	10	100	77.3	-0.92	11.97	19%	
		130	78.7	0.35	10.31	20%	
		150	76.22	1.99	19.45	17%	
	12	100	76.8	-1.48	12.46	19%	
		130	78.1	0.72	10.87	19%	
	14	130	77.9	-0.49	14.68	19%	
	TCF	8	100	80.4	-1.72	9.33	20%
			130	81.3	-0.79	8.51	21%
			150	79.6	-2.01	11.75	20%
10		100	79.9	-0.91	8.93	21%	
		130	81.8	-0.22	8.11	21%	
		150	78.8	-1.75	10.98	20%	
12		100	81.2	0.94	8.59	21%	
		130	81.4	0.54	9.01	21%	
14		130	78.9	1.78	12.44	20%	
Papel periódico			90	0.2	-4.5	25%	

Nota. Estos parámetros fueron obtenidos con el densitómetro X-Rite Basic utilizando la luz D50.

D. CÁLCULOS DE MUESTRA

Ecuación 12. Cálculo de Número Kappa

$$K = \frac{a}{w} \left(1 - \frac{A_e}{A_0} \right)$$

$$K = \frac{5 \text{ mL}}{0.10427 \text{ g}} \left(1 - \frac{0.3896}{1.2} \right) = 32.3839$$

Nota. Este cálculo se realizó empleando la ecuación 1 para determinar el Número Kappa de la muestra, utilizando como valor de absorbancia inicial constante de 1.2 A y la cantidad de permanganato de potasio de 5 mL en cada solución.

Ecuación 13. Cálculo de densidad según método gravimétrico

$$\rho = \frac{A}{A - B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L = 0.9965 \text{ g/mL}$$

Nota. Este cálculo se realizó empleando el método de densidad por el método gravimétrico a las condiciones de laboratorio establecidas.

Ecuación 14. Cálculo de materia seca de lámina en curva de secado

$$\text{Materia seca (\%)} = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100 = \frac{161 \text{ g} - 108.5 \text{ g}}{161.1 \text{ g}} \times 100 = 32.65 \pm 0.05\%$$

Nota. Este cálculo se hizo en todas las curvas de secado, para ir determinando el porcentaje de materia seca conforme el tiempo y así determinar la humedad de la lámina.

Ecuación 15. Cálculo de humedad de lámina en la curva de secado

$$\% \text{ Humedad} = 1 - \left(\frac{(M - m)}{M} \times 100 \right) = 1 - 32.65 \pm 0.05\%$$

$$\% \text{ Humedad} = 67.35 \pm 0.05\%$$

Nota. Este cálculo se hizo según la ecuación 4 de porcentaje de humedad de la AOAC.

Ecuación 16. Cálculo de área superficial para flux de curva de secado

$$A = l \times a = (0.316 \text{ m}) \times (0.135 \text{ m}) = 0.04266 \pm 0.0002255 \text{ m}^2$$

Nota. El área fue determinada según el marco utilizado, ya que al momento de realizar la lámina se tenían tres opciones. Si la muestra era prensada se sacó el área como una elipse, pues en la prensa hidráulica se obtenía esta figura.

Ecuación 17. Cálculo de flux en proceso de secado

$$N = -\frac{m_n \times (H_n - H_{n-1})}{A * (t_n - t_{n-1})} = -\frac{108.5 \text{ g} \times (0.6735 - 0.9330)}{(0.08532 \text{ m}^2) \times (30 \text{ min} - 0 \text{ min})}$$

$$= 10.9986 \pm 0.0682 \text{ kg evaporados} / \text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}$$

Nota. De esta manera se cálculo el flux de todas las muestras a lo largo de la investigación. Esta área va multiplicada por dos si las dos superficies de la muestra tienen contacto directo con el aire permitiendo la transferencia de humedad.

Ecuación 18. Balance de masa del proceso de proceso de secado

$$\dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{salida}} + \dot{H}_2O$$

$$\dot{H}_2O_{\text{evaporada}} = \dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}}$$

$$\dot{H}_2O_{\text{evaporada}} = A_e \rho_e v_e - A_s \rho_s v_s$$

$$\dot{H}_2O_{\text{evaporada}} = (0.3895 \text{ kg/s}) - (0.2439 \text{ kg/s})$$

$$\dot{H}_2O_{\text{evaporada}} = 0.1455 \text{ kg/s}$$

$$0.3895 \text{ kg/s} = 0.2439 \text{ kg/s} + 0.1455 \text{ kg/s}$$

Nota. El balance de masa fue realizado según la base de cálculo establecida de 430 gramos de entrada de pulpa con una humedad de 85%, teniendo un tiempo de secado de 150 minutos, saliendo a una humedad de 7%.

Ecuación 19. Balance de energía de proceso de secado

$$E_K + E_p + U = Q + W$$

$$\left(\frac{1}{2}\right) (\dot{m}_s v_s^2 - \dot{m}_e v_e^2) + \dot{m} (H_f - H_i) - W = Q$$

$$Q = \left(\frac{1}{2}\right) \left((0.2439 \text{ kg/s}) (12.2 \text{ m/s})^2 - (0.3895 \text{ kg/s}) (2.9 \text{ m/s})^2 \right)$$

$$+ (0.2439 \text{ kg/s}) (44.2 - 29.9) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire seco}}} - 24 \text{ kWh}$$

$$Q = -15.2386 \text{ kWh}$$

$$0.04129 \text{ kWh} + 8.72009 \text{ kWh} = 24 \text{ kWh} - 15.2386 \text{ kWh}$$

Nota. El balance de energía fue realizado según la base de cálculo establecida de 430 gramos de entrada de pulpa con una humedad de 85%, teniendo un tiempo de secado de 150 minutos, saliendo a una humedad de 7%. Se utilizó la carta psicrométrica para obtener el contenido de humedad y la entalpía para realizar el balance, según la humedad y temperatura del aire en cada condición. De igual forma se utilizó la velocidad de aire, área transversal y densidad del aire de salida del ventilador.

E. DATOS CÁLCULADOS

Cuadro 45. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF

Tiempo (min)	Incertidumbre (min)	Peso (g)	Incertidumbre (g)	Humedad base seca kg H ₂ O/kg sólido seco	Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)	Flux N kg evaporado/m ² ·m·s	Incertidumbre kg evaporado/m ² ·m·s
0	0.005	161.1	0.1	14.9878528	0.158045585		
30	0.005	110.3	0.1	9.946369735	0.107727117	19.8469	0.3232
60	0.005	75.9	0.1	6.532452066	0.073455882	13.4396	0.2232
90	0.005	41.7	0.1	3.138382756	0.038671971	13.3615	0.2360
120	0.005	11.2	0.1	0.111508078	0.002102234	11.9159	0.2881
150	0.005	10.8	0.1	0.071811361	0.001377589	0.1563	0.0038

Fuente. Elaboración propia con datos de lámina en el proceso de sacado.

Nota. Para determinar la humedad en base seca se utilizó como muestra seca 10.0764 g, en este caso se utilizó el marco pequeño para la producción de la lámina, teniendo un área superficial de 0.08532 m².

Cuadro 46. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF

Tiempo (min)	Incertidumbre (min)	Peso (g)	Incertidumbre (g)	Humedad base seca kg H ₂ O/kg sólido seco	Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)	Flux N kg evaporado/m ² .m.s	Incertidumbre kg evaporado/m ² .m.s
0	0.005	349.8	0.1	20.04123468	0.126281749		
30	0.005	243.7	0.1	13.65908774	0.087767277	43.6348	0.5183
60	0.005	167.7	0.1	9.087521603	0.060082345	31.2558	0.3745
90	0.005	108.2	0.1	5.508466532	0.038225635	24.4700	0.3005
120	0.005	54.7	0.1	2.290324578	0.017963868	22.0025	0.2898
150	0.005	21.4	0.1	0.287236782	0.003070234	13.6950	0.2192
180	0.005	17.5	0.1	0.052663256	0.000617714	1.6039	0.0273

Fuente. Elaboración propia con datos de lámina en el proceso de sacado.

Nota. Para determinar la humedad en base seca se utilizó como muestra seca 16.6245 g, en este caso se utilizó el marco pequeño para la producción de la lámina, teniendo un área superficial de 0.08532 m².

Cuadro 47. Pérdida de humedad base seca y fluxes de curva de sacado de pulpa deslignificada al 8% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF, prensada

Tiempo (min)	Incertidumbre (min)	Peso (g)	Incertidumbre (g)	Humedad base seca kg H ₂ O/kg sólido seco	Incertidumbre (kg H ₂ O/kg sólido seco)	Flux N kg evaporado/m ² .m.s	Incertidumbre kg evaporado/m ² .m.s
0	0.005	58.9	0.1	3.504049821	0.032744422		
20	0.005	47.6	0.1	2.639945187	0.025733615	44.4002	1.1429
35	0.005	41.9	0.1	2.204069398	0.022114703	29.8661	0.7740
50	0.005	36.2	0.1	1.768193608	0.01840579	29.8661	0.7840
75	0.005	30.3	0.1	1.317023932	0.014417821	18.5484	0.4963
90	0.005	26.8	0.1	1.049380093	0.011940157	18.3388	0.4984
105	0.005	23.9	0.1	0.827619537	0.009791603	15.1950	0.4197
120	0.005	21.2	0.1	0.621152058	0.007679877	14.1471	0.3982
135	0.005	19.6	0.1	0.498800959	0.006398206	8.3835	0.2392

Fuente. Elaboración propia con datos de lámina en el proceso de sacado.

Nota. Para determinar la humedad en base seca se utilizó como muestra seca 13.0771 g, en este caso se obtuvo la muestra prensada de la prensa hidráulica con área superficial de 0.01272 m².

Cuadro 48. Costo de producción de embalajes de huevos a partir de pulpa deslignificada

Descripción	Costo Unitario (Q)	Unidades	Costo total (Q)
Pulpa deslignificada	0.05	4218.75	201.66
Secado	0.90	24	21.53
			223.19

Fuente. Elaboración propia con datos de lámina en el proceso de sacado y Zelada (2021).

Nota. El costo fue determinado para un batch de 280 cartones de huevos, teniendo un peso promedio de 48 g/cartón, con un rendimiento de 31 cartones/kg de pulpa; siendo el costo unitario de Q0.08/cartón.

F. ANÁLISIS DE ERROR

Ecuación 20. Propagación de error de área superficial

$$\delta = A \times \sqrt{\frac{\delta_l}{l} + \frac{\delta_a}{a}} = 0.04266 \times \sqrt{\frac{0.0005}{0.316} + \frac{0.0005}{0.135}} = 0.0002255 \text{ m}^2$$

Nota. De esta forma fue calculada cada propagación de error de las áreas superficiales de las láminas desarrolladas para posteriormente calcular el flux.

Ecuación 21. Propagación de humedad base seca en kg H₂O/kg sólido seco

$$\delta = H_{bs} \times \sqrt{\frac{\delta_{m_s}}{m_s} + \frac{\delta_{m_h}}{m_h}} = 14.9878 \times \sqrt{\frac{0.1}{10.0764} + \frac{0.1}{161.1}} = 0.1580 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg sólido seco}$$

Nota. Con esta ecuación se calculó la propagación de error de la humedad m/m en base seca de todas las curvas de secado realizadas. De esta misma forma se calcularon los análisis de error de los cocientes y productos.

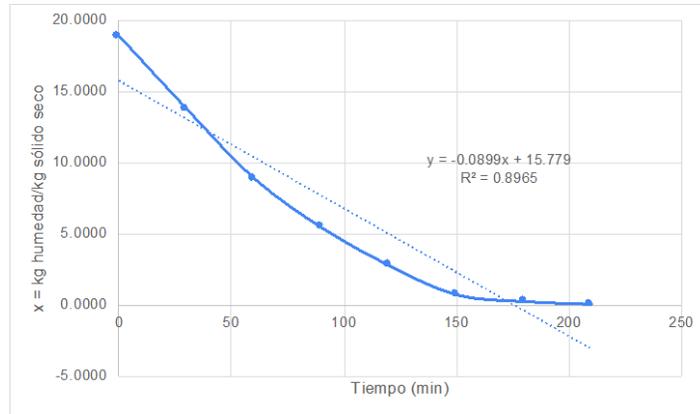
Ecuación 22. Propagación de error de flux

$$\begin{aligned} \delta &= \text{flux} \times \sqrt{\frac{\delta_t}{t} + \frac{\delta_A}{A} + \frac{\delta_{H_{bs}}}{H_{bs}}} = 17.4530 \times \sqrt{\frac{0.005}{30} + \frac{0.00451}{0.08532} + \frac{0.1077}{9.9464}} \\ &= 0.3232 \text{ kg evaporado} / \text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

Nota. De esta manera se encontró la propagación de error de los fluxes en las diferentes curvas de secado realizadas.

G. CURVAS DE SECADO A OTRAS CONDICIONES

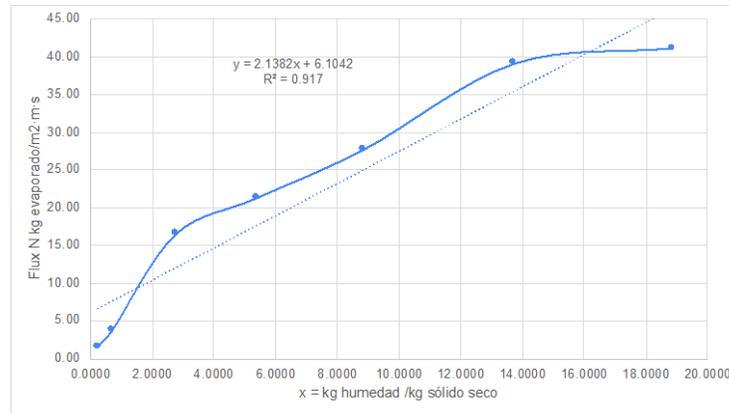
Figura 28. Curva de humedad en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 130 min y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. A estas condiciones se llegó a una humedad final de $5.61 \pm 0.05\%$ m/m en base seca, con un tiempo de secado de 210 minutos a 120 °C.

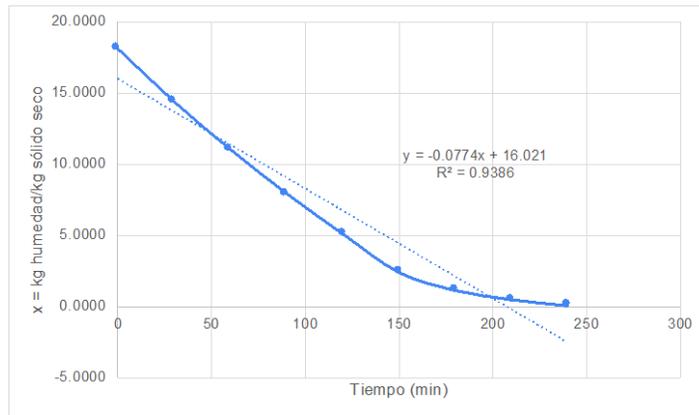
Figura 29. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 130 minutos y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

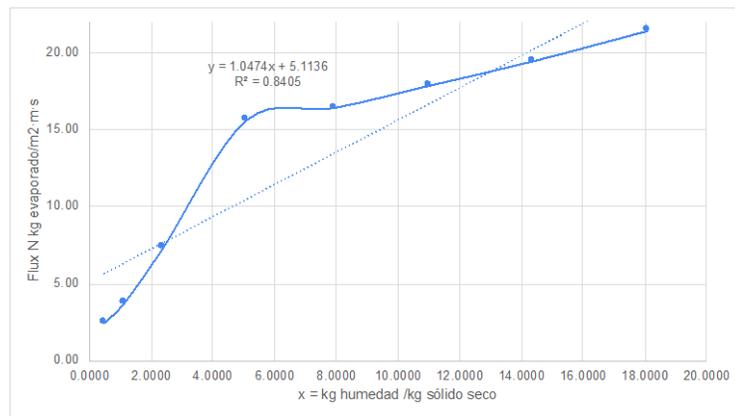
Figura 30. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 8% por 130 min y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. A estas condiciones se llegó a a una humedad final de $5.87 \pm 0.03\%$ m/m, con un tiempo de secado de 240 minutos a 120 °C.

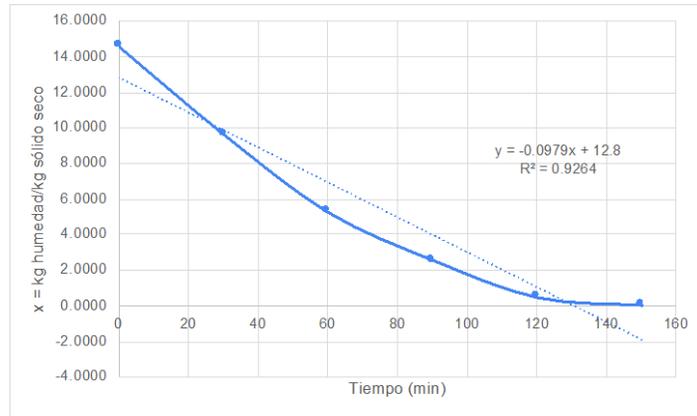
Figura 31. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 8% por 130 minutos y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.2400 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

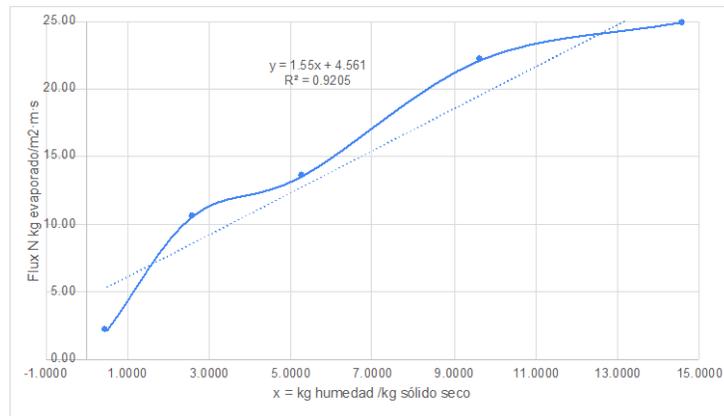
Figura 32. Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 10% por 100 min y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. A estas condiciones se llegó a una humedad base seca final de $7.39 \pm 0.11\%$ m/m, con un tiempo de secado de 150 minutos a 120 °C.

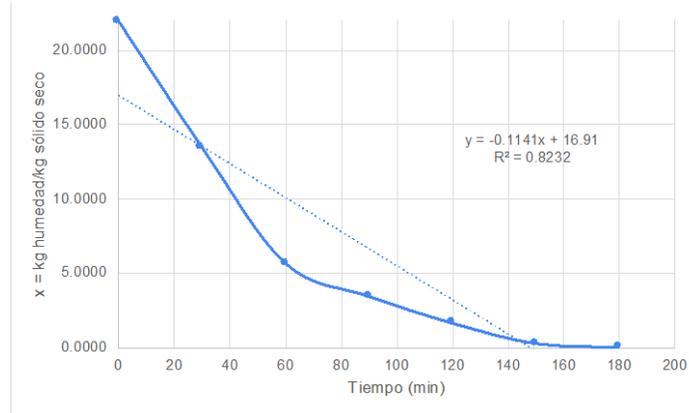
Figura 33. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 10% por 100 minutos y blanqueada por el método ECF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

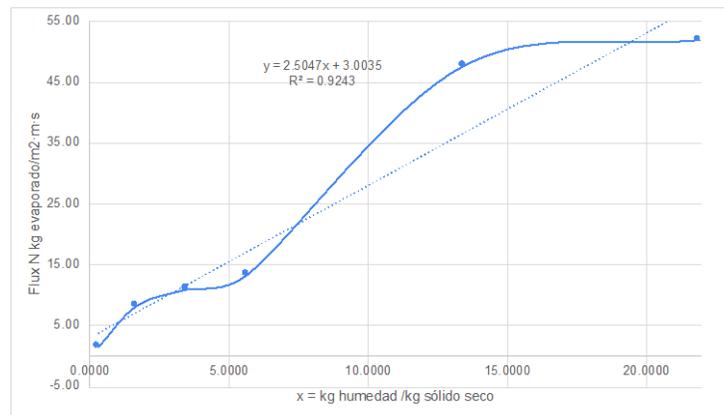
Figura 34 . Curva de humedad base seca en función del tiempo de pulpa deslignificada 10% por 100 min y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. A estas condiciones se llegó a a una humedad base seca final de $4.80 \pm 0.06\%$ m/m, con un tiempo de secado de 180 minutos a 120 °C.

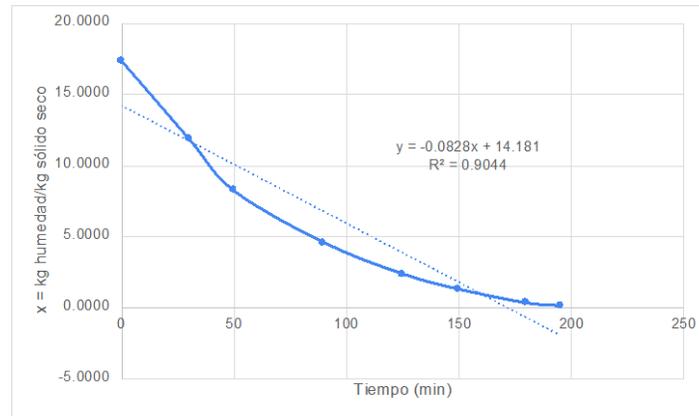
Figura 35. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada 10% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

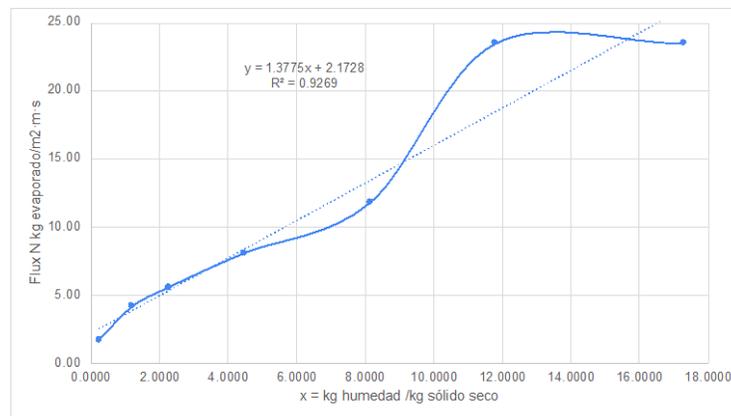
Figura 36. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 30 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $6.16 \pm 0.11\%$ m/m, en un tiempo de secado de 195 minutos.

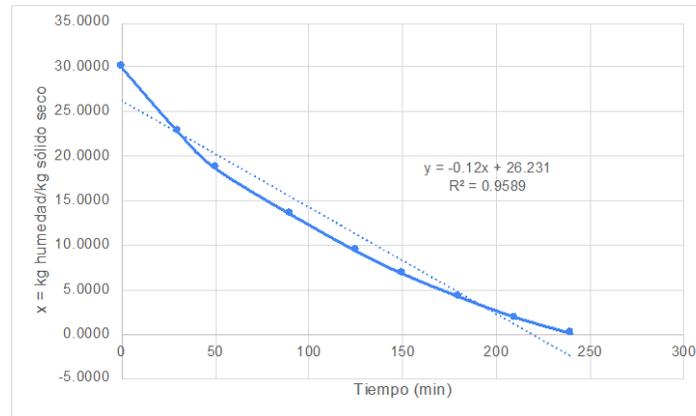
Figura 37. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

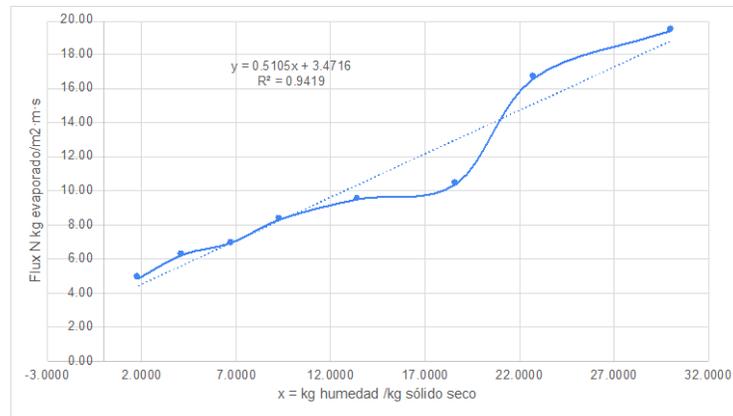
Figura 38. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 30 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $3.45 \pm 0.04\%$ m/m, en un tiempo de secado de 240 minutos.

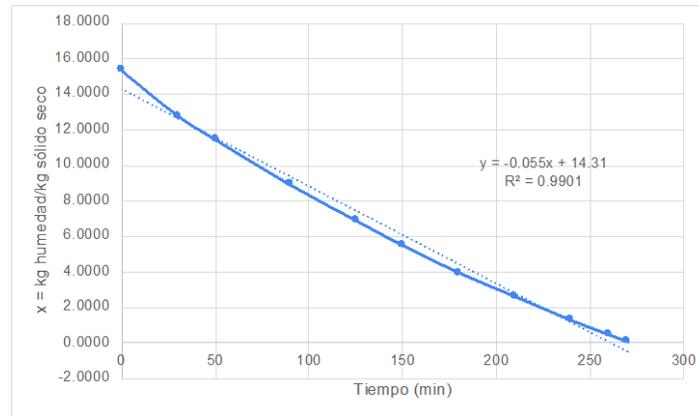
Figura 39. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.2400 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

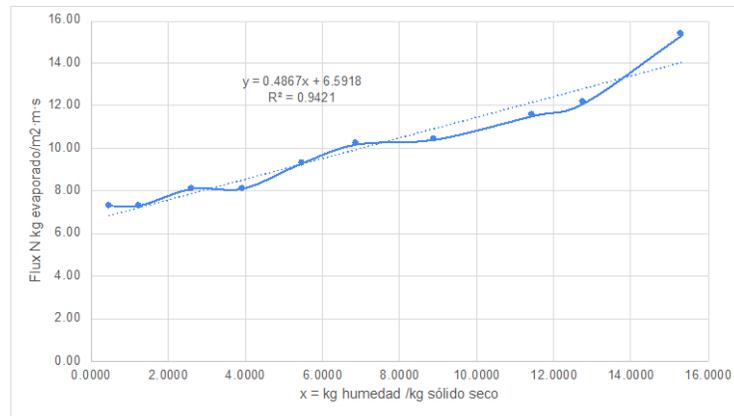
Figura 40. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 60 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $7.02 \pm 0.01\%$ m/m, en un tiempo de secado de 270 minutos.

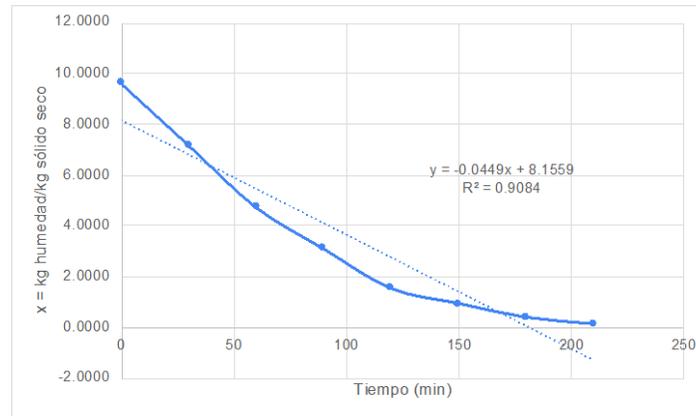
Figura 41. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.8250 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

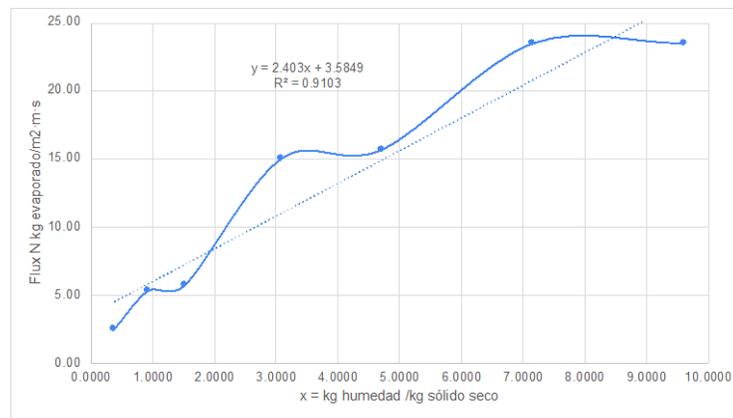
Figura 42. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método TCF, sin cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $11.78 \pm 0.09\%$ m/m, en un tiempo de secado de 210 minutos.

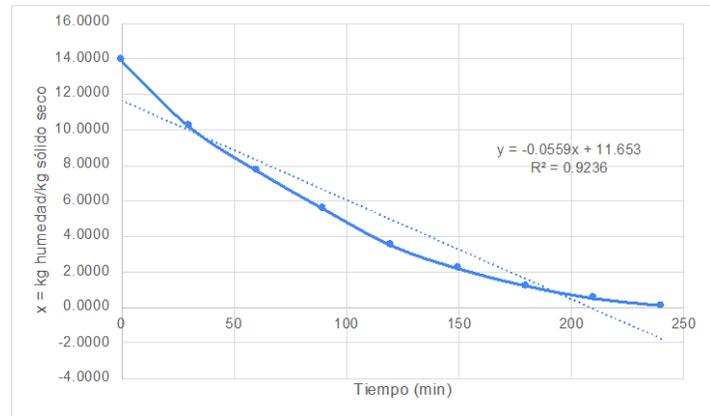
Figura 43. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

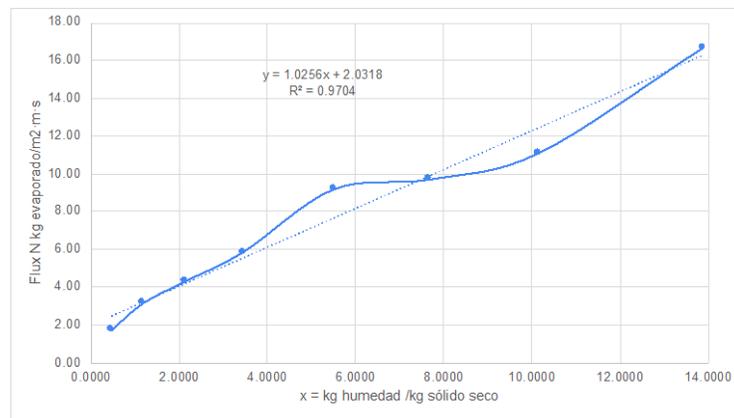
Figura 44. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método TCF, sin cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $7.82 \pm 0.05\%$ m/m, en un tiempo de secado de 240 minutos.

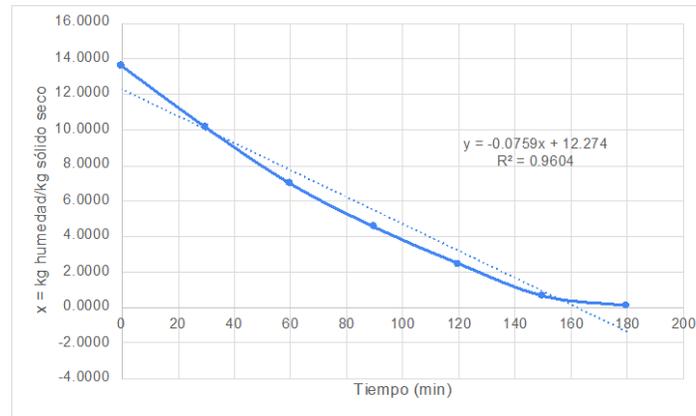
Figura 45. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 90 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.2400 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

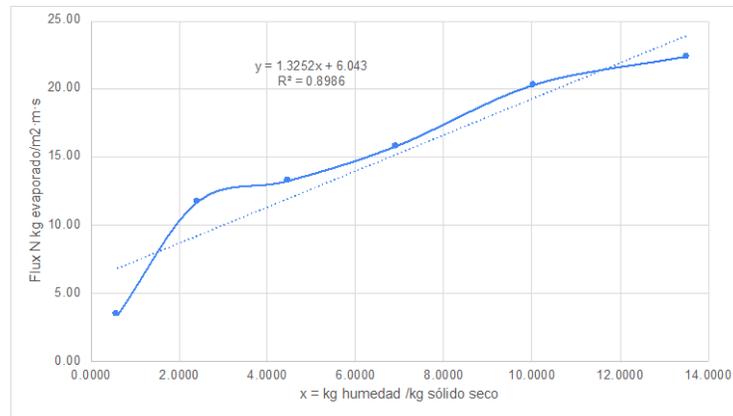
Figura 46. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $8.03 \pm 0.09\%$ m/m, en un tiempo de secado de 180 minutos.

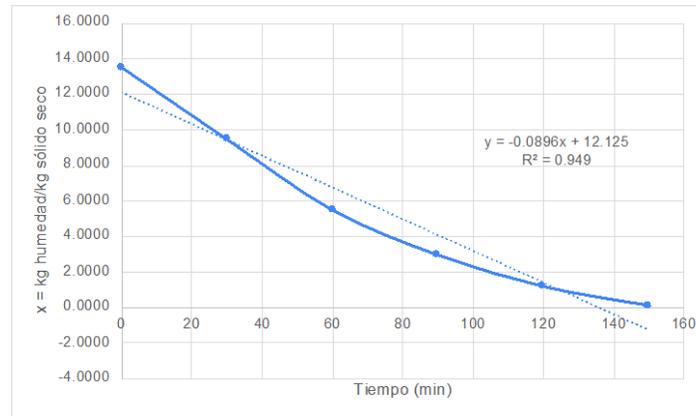
Figura 47. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

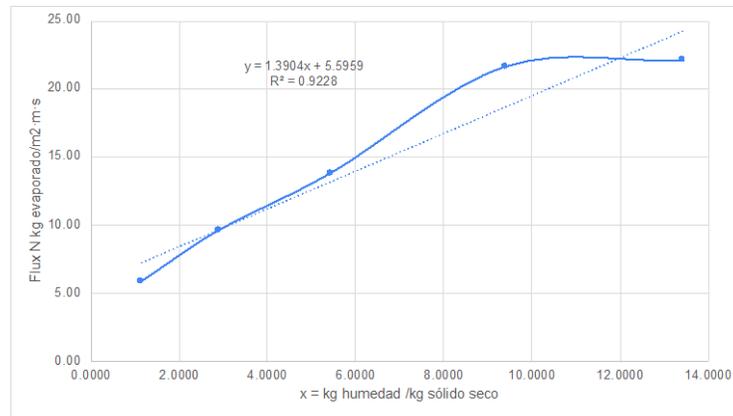
Figura 48. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $8.09 \pm 0.10\%$ m/m, en un tiempo de secado de 150 minutos.

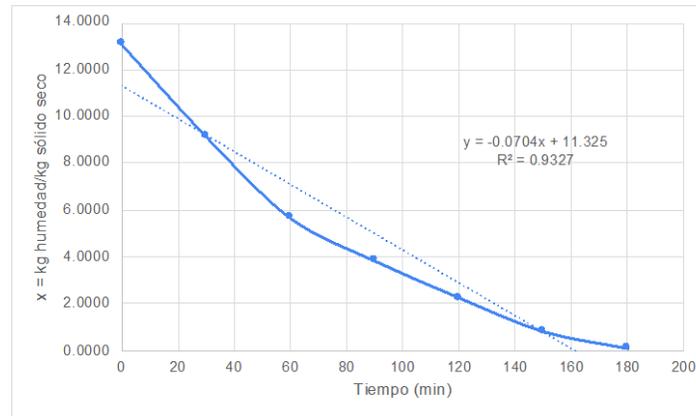
Figura 49. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

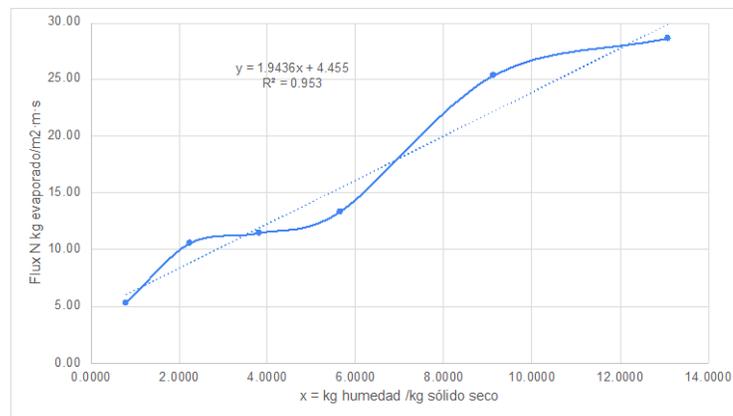
Figura 50. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; se obtuvo su humedad en base seca final de $8.32 \pm 0.09\%$ m/m, en un tiempo de secado de 180 minutos.

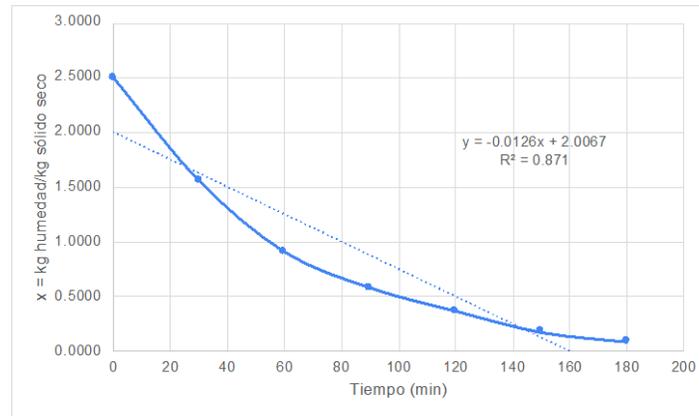
Figura 51. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

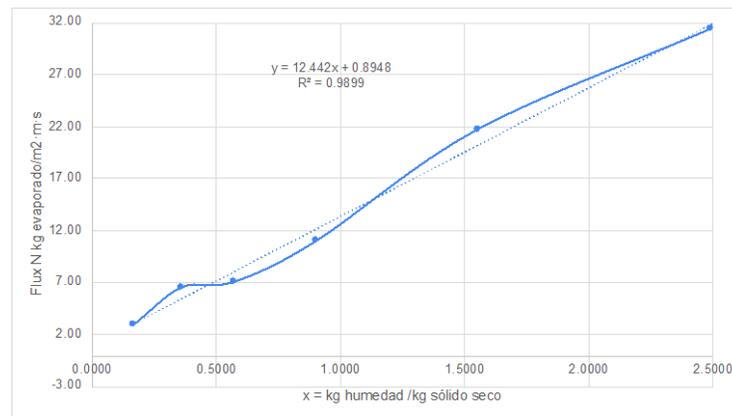
Figura 52. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; realizando el proceso de prensado previo al secado, se obtuvo su humedad en base seca final de $8.08 \pm 0.19\%$ m/m, en un tiempo de secado de 180 minutos.

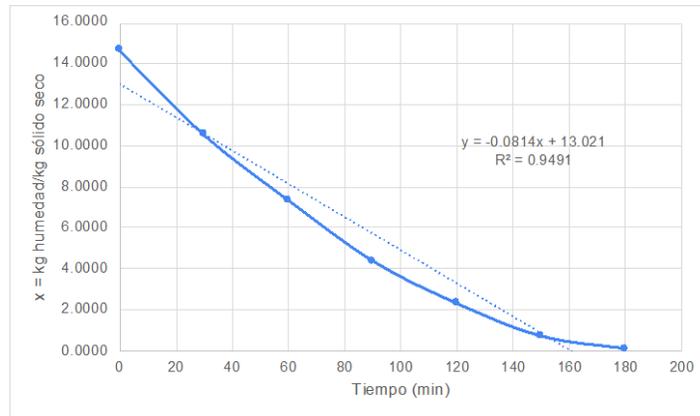
Figura 53. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.1272 m^2 que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

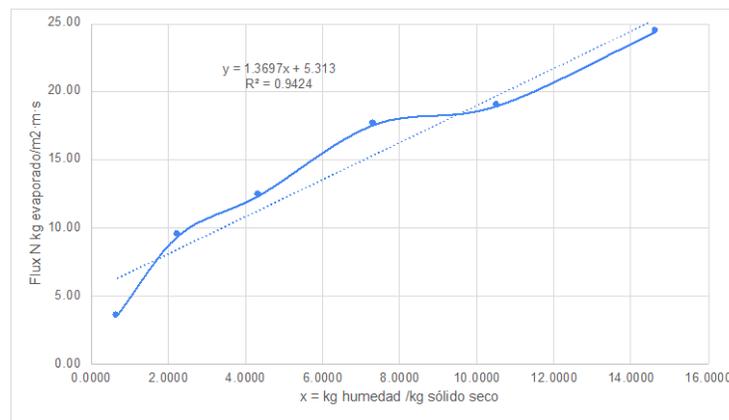
Figura 54. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 100 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método TCF, sin cloro; realizando el proceso de prensado previo al secado, se obtuvo su humedad en base seca final de $7.38 \pm 0.09\%$ m/m, en un tiempo de secado de 180 minutos.

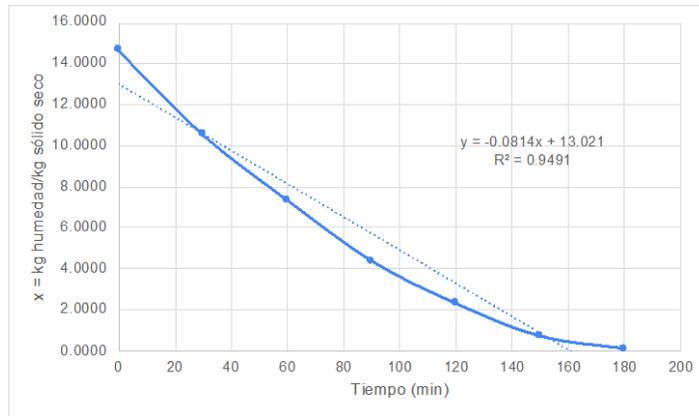
Figura 55. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 105 °C con muestra previamente prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

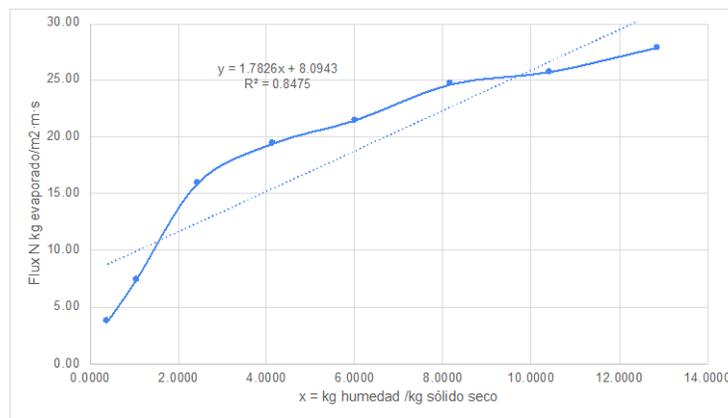
Figura 56. Curva humedad base seca en función del tiempo de secado de pulpa celulósica deslignificada y blanqueada de biomasa a 120 °C



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota: esta curva fue realizada para la pulpa deslignificada a 100 minutos y 14% de hidróxido de sodio; fue blanqueada por el método ECF, con cloro; realizando el proceso de prensado previo al secado, se obtuvo su humedad en base seca final de $8.48 \pm 0.06\%$ m/m, en un tiempo de secado de 240 minutos.

Figura 57. Curva de rapidez de secado de pulpa deslignificada y blanqueada de biomasa a 120 °C con muestra previamente prensada



Fuente. Elaboración propia con datos de experimentación, a condiciones de 0.986 atm y 23 °C.

Nota. Se determinó el flux del proceso de secado conforme el área superficial de 0.08532 m² que tenía contacto con el aire caliente permitiendo la evaporación de agua.

H. FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO

Figura 58. Raquis de plantación de banano



Nota. El raquis es la materia prima de todo el proceso realizado iniciando desde el momento de la deslignificación del mismo. Este está completo en este caso, pero debe ser triturado para que se puede realizar el proceso de manera adecuada.

Figura 59. Preparación de pulpa previo al laminado



Nota. Este proceso se realizó para poder tener una mejor homogenización al momento de realizar las láminas. Como base de cálculo se utilizó agregar seis litros de agua a 500 gramos de pulpa deslignificada y blanqueada.

Figura 60. Laminado de pulpa en marco pequeño



Nota. La pulpa fue agregada a los marcos para el proceso de laminado, procurando tener un espesor lo más uniforme posible.

Figura 61. Prensa hidráulica del Laboratorio de Operaciones Unitarias utilizada para pulpa prensada antes al secado



Nota. La prensa hidráulica fue utilizada como un paso previo al secado para remover humedad, así como tener un espesor más homogéneo. Durante el proceso de investigación se hizo uso de esta prensa que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 62. Medición de muestra posterior al proceso de prensado.



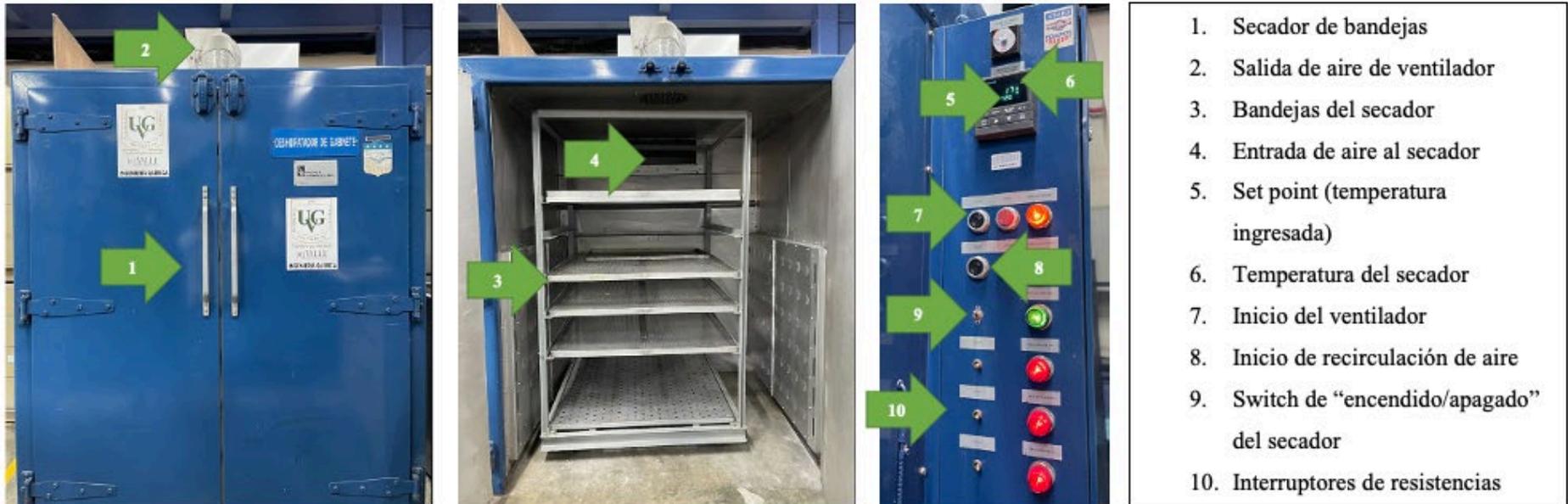
Nota. En este caso se puede ver que la forma que se obtiene de la muestra después del proceso de secado es similar a una elipse por lo que se debe calcular el área según esta figura y las medidas obtenidas.

Figura 63. Secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias utilizado en la investigación



Nota. Durante todo el proceso de investigación se hizo uso del secador de bandejas que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 64. Diagrama de secador de Laboratorio de Operaciones Unitarias



Fuente. Elaboración propia con fotos del secador de bandejas del laboratorio de operaciones unitarias (UVG)

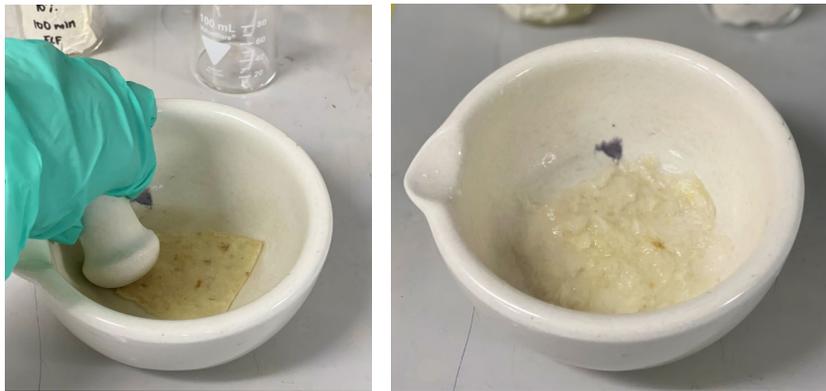
Nota. El secador de bandejas marca Corbett Industries Inc., modelo EC-404-6 se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 65. Lámina después del proceso de secado



Nota. Esta muestra fue realizada en el marco más grande de esta investigación.

Figura 66. Preparación de muestra para medición de pH



Nota. La muestra fue macerada que la solución desarrollada fuese significativa.

Figura 67. Medición de pH de muestra de lámina obtenida después del proceso de secado



Nota. En esta figura se muestra la lectura del pH de la muestra de la lámina seca de la pulpa celulósica deslignificada 10% por 100 minutos y blanqueada por el método TCF (sin cloro). Se utilizó el potenciómetro del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 68. Celdas de cuarzo utilizadas en el Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35



Nota. Las celdas utilizadas son del laboratorio *Global Quality S.A.*

Figura 69. Celda de cuarzo con muestra para ser leída Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35 del laboratorio *Global Quality S.A.*



Figura 70. Porta celdas de Espectrofotómetro UV/VIS Perkin Elmer Lambda 35 del laboratorio *Global Quality S.A.*

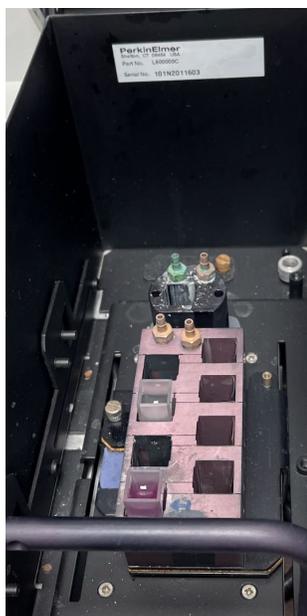
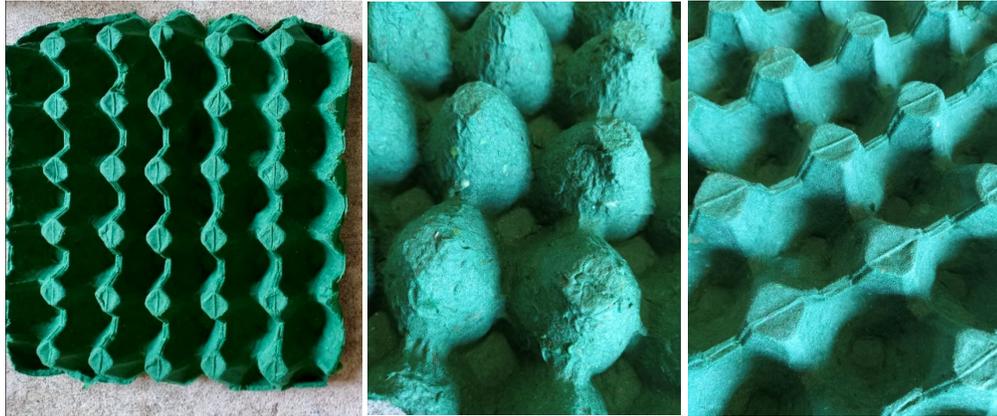


Figura 71. Pulpa para embalaje de huevos previo al proceso de secado



Nota. El formado del cartón para embalaje de huevos se realizó por medio de succión, y en este caso se muestra la pasta formada con 75% pulpa celulósica y 25% cartón.

Figura 72. Embalaje para huevos creado a partir de 75% de pulpa celulósica de raquis de banano



Nota. Este producto fue creado como ejemplo de aplicación comercial de la pulpa. Para obtener dicho producto se tuvo un tiempo de secado de 20 minutos en un horno a temperaturas entre 140 °C y 160 °C, posteriormente al proceso de prensado para la formación del molde. En este caso se utilizó 75% de pulpa celulósica y 25% de cartón como mezcla para la pasta a utilizar; y la relación con agua fue de 4:1, siendo 4 partes de agua y 1 de pasta.

Figura 73. Embalaje para huevos previo y posterior al proceso de secado, creado a partir de 15% de pulpa celulósica de raquis de banano



Nota. En este caso se utilizó 15% de pulpa celulósica, 55% cartón, 16% papel de litografía, 7% papel manila y 7% papel periódico.

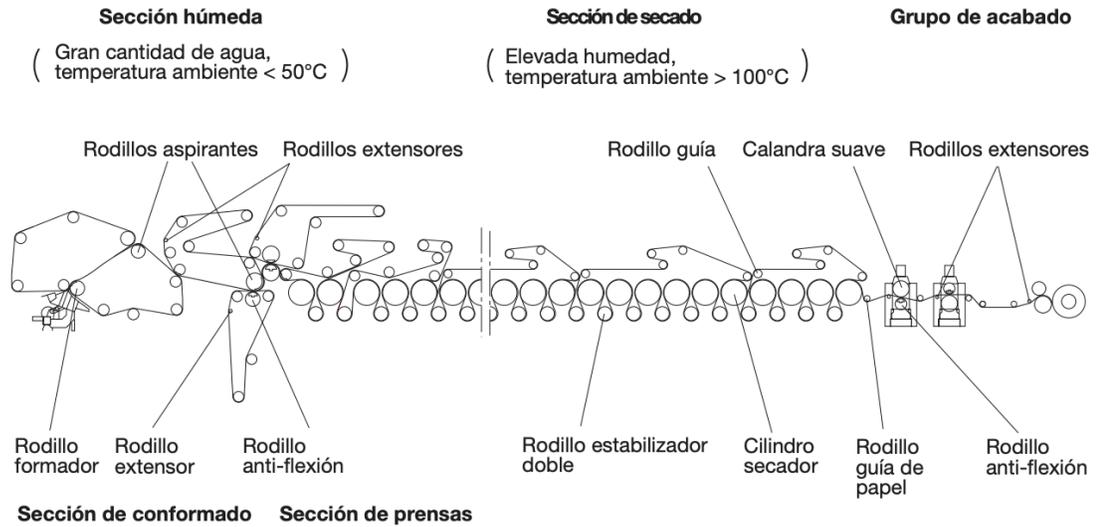
Figura 74. Secador de banda continuo GEM



Fuente. GEM (2020)

Nota. Este es el secador propuesta nivel industrial para un proceso similar al investigado.

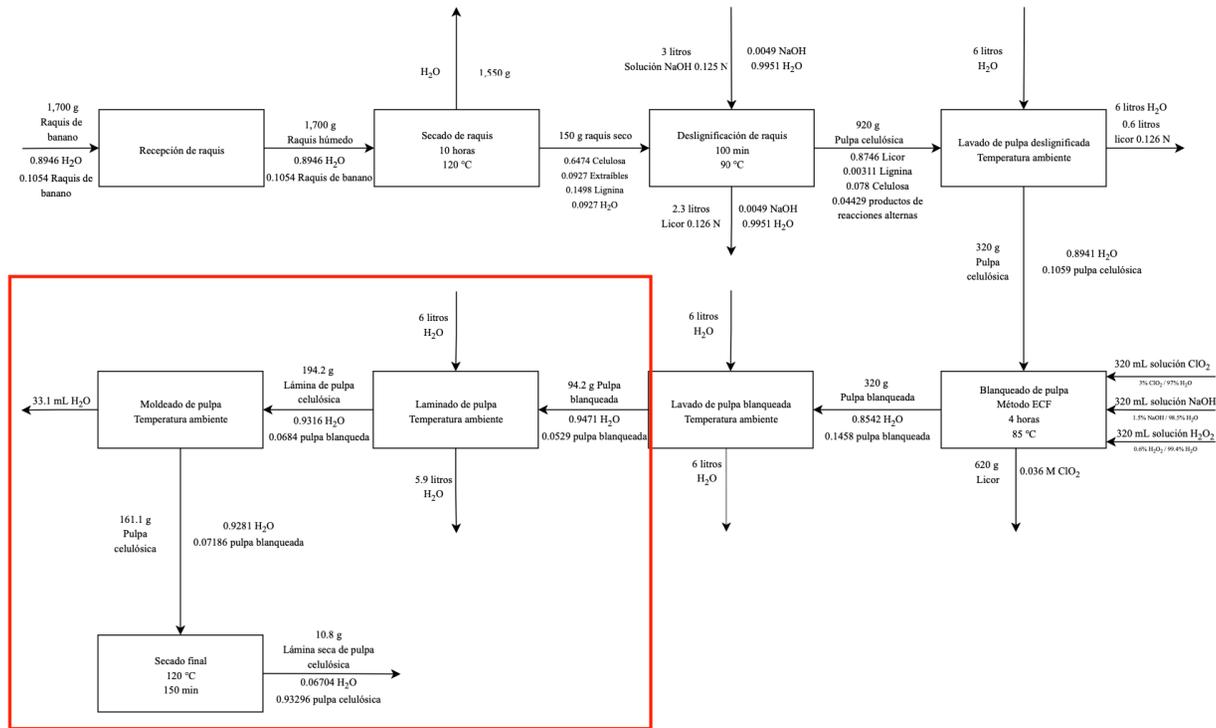
Figura 75. Proceso de rodamiento de papel con maquinaria moderna



Fuente. Schaeffler Group (2018)

Nota. Este es el proceso que la empresa Schaeffler Group propone teniendo un cilindro de secado posterior a rodillos de formación de papel.

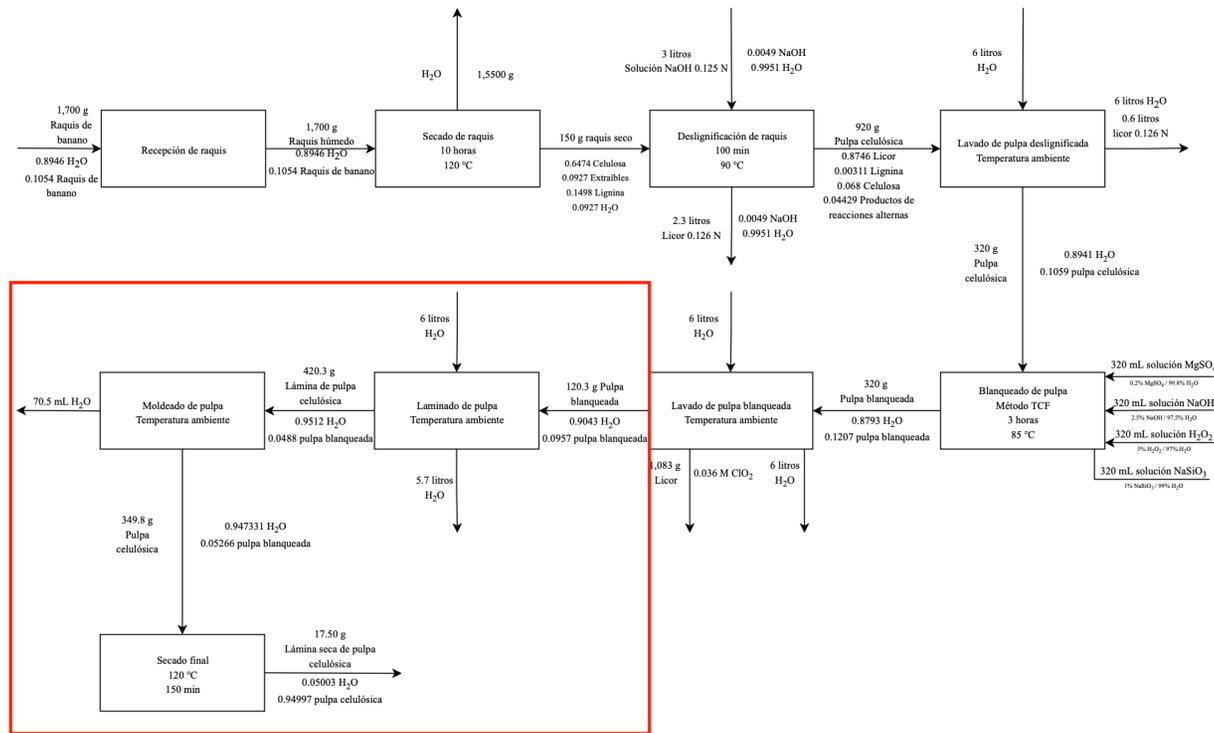
Figura 76. Proceso completo desde deslignificación de raquis de banana hasta obtención de lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada por método ECF a escala laboratorio



Fuente. Elaboración propia con datos experimentales y datos recabados de Serrano (2021) y Zelada (2021). Trabajado a condiciones de 0.99 atm y 23 °C.

Nota. Este es el proceso completo de la obtención de la lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada. Se tomo en cuenta como base de cálculo el inicio del proceso de deslignificación con 150 g de raquis triturado y con humedad de 9.27%. En este diagrama se tiene el blanqueo por método ECF (con cloro). La parte marcada en rojo es la del secado, siendo la desarrollada en este estudio.

Figura 77. Proceso completo desde deslignificación de raquis de banano hasta obtención de lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada por método TCF a escala laboratorio



Fuente. Elaboración propia con datos experimentales y datos recabados de Serrano (2021) y Zelada (2021). Trabajado a condiciones de 0.99 atm y 23 °C.

Nota. Este es el proceso completo de la obtención de la lámina seca de pulpa deslignificada y blanqueada. Se tomo en cuenta como base de cálculo el inicio del proceso de deslignificación con 150 g de raquis triturado y con humedad de 9.27%. En este diagrama se tiene el blanqueo por método TCF (sin cloro). La parte marcada en rojo es la del secado, siendo la desarrollada en este estudio.

Figura 78. Certificación de Espectrofotómetro utilizado para la investigación

asi,s.a.
AUTOMATIZACIÓN Y SERVICIOS DE INGENIERÍA S.A.
19 avenida 02-78 Edificio Distrito Miraflores
Nivel 5 Apartamento 508 Zona 11, Guatemala
TEL. 2474 0558 / 50189777
info@autsa.com / daniel.perez@autsa.com

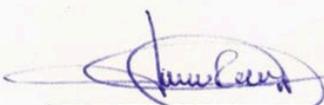
CERTIFICADO DE CALIFICACIÓN

CERTIFICADO No. 0610321V

Página 1 de 6

Cliente:	GLOBAL QUALITY S.A.
Dirección Del Cliente:	Km. 17.5 carretera a San José Pinula Empresarial San José, Bodega No. 6 Fraijanes Guatemala.
Calificación:	Espectrofotómetro
Objeto:	Espectrofotómetro UV-VIS
Marca:	Perkin Elmer
Modelo:	Lambda 35
Serie:	101N2011603
Identificación interna laboratorio:	0610321V
Identificación interna cliente:	LQ-006
Fecha de Calificación:	15/03/2021
Lugar de Calificación:	Global Quality S.A.
Fecha de Próxima Calificación: (Indicado por el cliente)	Marzo 2022
Fecha de Emisión del Certificado:	22/03/2021
Observaciones:	N/D



REVISIÓN Y APROBACIÓN	SELLO
 Lester Jacobo Coordinación Técnica	

Fuente. Laboratorio Global Quality S.A.

Nota. El laboratorio *Global Quality S.A.*, brindó apoyo prestando equipo certificado para la realización de las corridas para obtener el número Kappa de las muestras.

XIII. GLOSARIO

Absorbancia	Medida que muestra cómo se mitiga la radiación cuando atraviesa una muestra. En el espectrofotómetro indica cuanta luz se puede absorber por la muestra.
Blanqueo	Técnica que consiste en poner más blanco un producto.
Celulosa	Polímero lineal compuesto por moléculas de β -glucosa.
Celulosa blanca de fibra corta	Celulosa utilizada en proceso de producción de papel o cartón para dar suavidad o relleno.
Celulosa blanca de fibra larga	Celulosa utilizada en proceso de producción de papel o cartón para agregar resistencia.
Densidad	Cantidad de masa en un determinado volumen, se simboliza con el símbolo rho (ρ) y se expresa en kg/m^3 o g/cm^3 .
Deslignificación	Eliminación de lignina de forma total o parcial, de madera u otra materia vegetal, a través de tratamientos químicos para obtener pasta de celulosa.
Entalpía	Energía que el sistema intercambia con sus alrededores.
Espectrofotómetro UV/VIS	Equipo que permite determinar de forma cuantitativa la absorbancia (intensidad de luz absorbida) tras pasar una solución, siendo la muestra.

Espesor	También conocido como calibre, distancia que hay entre las dos caras de una hoja, se mide con un micrómetro teniendo valores en milímetros.
Gramaje	Masa de hoja expresada en unidades de área (g/m^2).
Humedad	Cantidad de agua, vapor de agua u otro líquido presente en la superficie o interior de otro cuerpo.
Lignina	Polímero orgánico complejo que cumple como material esgtructural en el tejido de soporte de plantas vasculares y algas.
Número Kappa	Cantidad de lignina que queda presente en la pulpa.
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Concentración de iones de hidrógeno presentes en la disolución.
PLC	“Programmable logic controller”, en español controlador lógico programable, se utiliza para controlar procesos inudtriales en la ingeniería automática y se compone por el CPU, las interfaces de entrada y salida, módulo de memorias, fuente de alimentación y software.
Raquis	También es llamado pinzote o vástago, tiene forma helicoidal y es la parte de la planta de banano encargada de sostener los racimos del fruto.
Secado	Acción de remover humedad de un sólido sin utilizar métodos mecánicos.
Temperatura de búlbo húmedo	Temperatura resultante de evaporar el agua que cubre el termómetro ordinario. Esta siempre es menor que la temperatura de bulbo seco.

Temperatura de búlbo seco

Es la temperatura obtenida con un termómetro convencional.

Velocidad de secado

Cantidad humedad que es perdida a lo largo del tiempo por una unidad de área determinada.

XIV. ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius	m²	Metros cuadrados
A	Área superficial	m_h	Masa sólido húmedo
H₂O	Agua	Min	Minutos
H_{bh}	Humedad base húmeda	m_s	Masa sólido seco
H_{bs}	Humedad base seca	N	Velocidad de secado
kg	Kilogramos	s	Segundos
m	Metros		