

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de deslignificación de raquis de banano para la  
elaboración de pasta celulósica

Trabajo de graduación presentado por Lesly Eunice Zelada  
Pérez para optar al grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2021



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de deslignificación de raquis de banano para la  
elaboración de pasta celulósica

Trabajo de graduación presentado por Lesly Eunice Zelada  
Pérez para optar al grado académico de Licenciada en  
Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2021

Vo. Bo. :

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

Tribunal Examinador:

(f)

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

(f)

Ing. Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

(f)

Ing. María José Ramos Valdés, M. Sc.

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de diciembre de 2021

## Prefacio

La elaboración de este trabajo de graduación surgió del interés por un tema que brinde información para la industria agrícola guatemalteca y específicamente para la divulgación científica. De esta manera, el propósito de la investigación es el servicio a Guatemala a través de la Ingeniería Química Industrial.

Esta investigación no se podría haber llevado a cabo sin el apoyo de muchas personas. En primer lugar agradezco a Dios, quien en su gracia me dio la oportunidad de estudiar y me ha acompañado durante toda mi vida. Agradezco y dedico esta investigación a mi mamá, Gloria Eunice Pérez, quién ha sido una compañía incondicional, este trabajo también es reflejo de su dedicación y esfuerzo.

También agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala y a Iglesia Vida Real, quienes me han apoyado y dado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria al becarme. Las palabras se quedan cortas para describir mi agradecimiento.

Un lugar destacado debo al Ing. Gamaliel Zambrano, por su orientación a lo largo de este trabajo. También agradezco al Ing. Luis Ernesto Nuñez por sus comentarios, sugerencias y observaciones. Ambos contribuyeron con mi proceso de aprendizaje, son personas a las que tengo en gran estima y admiración.

Asimismo, debo agradecer el apoyo a muchos amigos que, al mismo tiempo que me animaron a concluir el trabajo, me han ayudado con su alegría, conocimiento y paciencia: Ana Luisa Samayoa, Lai-Wah Serrano, Sergio Sánchez, Marco Ramos, Yasmin Chávez y Daniel Monroy.

Debo mi más sincera consideración y agradecimiento al personal del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala y al laboratorio Global Quality S.A., quienes me apoyaron durante todos los análisis en este trabajo.

Finalmente, también dedico este trabajo a mi papá, Sergio Zelada, que aunque ya no está presente físicamente, lo llevo en mi corazón y fue de inspiración para concluir esta investigación.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

# Índice

Prefacio.....	v
Lista de cuadros.....	vii
Lista de figuras.....	xi
Resumen.....	xiv
I. Introducción.....	1
II. Objetivos.....	2
III. Justificación.....	3
IV. Marco teórico.....	4
A. Proceso de pulpeo.....	4
B. Selectividad de deslignificación.....	5
C. Propiedades de la lignina.....	6
D. Propiedades de la celulosa.....	10
E. Reacciones de degradación.....	12
G. Efecto del oxígeno en la deslignificación.....	15
H. Método KAPPA.....	16
I. Transferencia de calor.....	17
J. Consistencia de pulpa según método Tappi 240.....	18
K. Ecuaciones.....	18
V. Antecedentes.....	28
VI. Metodología.....	31
VII. Datos finales.....	45
VIII. Discusión de resultados.....	55
IX. Conclusiones.....	63
X. Recomendaciones.....	66
XI. Bibliografía.....	68
XII. Anexo.....	71

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Propiedades de raquis previamente triturado utilizado como materia prima para el proceso de deslignificación. ....	45
Cuadro 2. Características finales de raquis de banano triturado y deslignificado por cocción alcalina .....	46
Cuadro 3. Cumplimiento de características finales de raquis de banano triturado y deslignificado por cocción alcalina .....	47
Cuadro 4. Modelo matemático propuesto para describir la reacción de deslignificación y reacción de oxidación con permanganato de potasio a diferentes condiciones. ....	53
Cuadro 5. Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo matemático que describe el grado de deslignificación y reacción de oxidación a las diferentes condiciones estudiadas del 8 % de carga de hidróxido de sodio.....	53
Cuadro 6. Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo matemático que describe el grado de deslignificación y reacción de oxidación a las diferentes condiciones estudiadas del 10 % de carga de hidróxido de sodio .....	54
Cuadro 7. Datos obtenidos para la evaluación de características geométricas de raquis de banano entero sin triturar entregado por bananera .....	71
Cuadro 8. Datos obtenidos para evaluación de características geométricas de raquis de banano triturado sin prensar entregado por bananera.....	72
Cuadro 9. Datos para la evaluación de características geométricas de trozos de raquis de banano previamente triturado y prensado por la bananera .....	73
Cuadro 10. Datos de humedad inicial de trozos de raquis previamente triturado y prensado entregado por bananera.....	74
Cuadro 11. Datos de humedad inicial de trozos de raquis previamente triturado y sin prensar entregado por la bananera .....	74
Cuadro 12. Datos de humedad final de trozos de raquis previamente triturado, prensado y seco en deshidratador industrial. ....	75
Cuadro 13. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	75
Cuadro 14. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	76
Cuadro 15. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	76

Cuadro 16. Datos para la determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	77
Cuadro 17. Datos para la determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	77
Cuadro 18. Datos para la determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	77
Cuadro 19. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	78
Cuadro 20. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	78
Cuadro 21. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	78
Cuadro 22. Valores de pulpa ingresados, licor y pulpa obtenida al finalizar el proceso de deslignificación por cocción alcalina con NaOH para cálculo de rendimiento.....	79
Cuadro 23. Datos para la obtención de consistencia de pulpa de raquis de banano previamente triturado y prensado después de deslignificación con NaOH. ....	80
Cuadro 24. Lecturas con espectrofotometría para el cálculo del número kappa de la pulpa de raquis de banano seca previamente deslignificada por cocción alcalina.....	81
Cuadro 25. Resultado de valoración de licor para determinación de cantidad de hidróxido de sodio consumido durante reacción de deslignificación. ....	81
Cuadro 26. Evaluación de características geométricas de raquis de banano entero sin triturar entregado por bananera.....	92
Cuadro 27. Evaluación de características geométricas de raquis de banano triturado sin prensar entregado por bananera.....	93
Cuadro 28. Evaluación de características geométricas de trozos de raquis de banano previamente triturado y prensado por la bananera.....	94
Cuadro 29. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	95
Cuadro 30. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	95
Cuadro 31. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.....	96

Cuadro 32. Determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	96
Cuadro 33. Determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	97
Cuadro 34. Determinación de la cantidad de $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	97
Cuadro 35. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de primera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco. ....	98
Cuadro 36. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de segunda muestra de raquis de banano previamente triturado y seco. ....	99
Cuadro 37. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de tercera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco. ....	100
Cuadro 38. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	101
Cuadro 39. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	101
Cuadro 40. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco. ....	102
Cuadro 41. Rendimiento de pulpa en el proceso de deslignificación por cocción alcalina de raquis de banano previamente triturado y seco. ....	102
Cuadro 42. Obtención de consistencia de pulpa de raquis de banano previamente triturado y prensado después de deslignificación con NaOH. ....	103
Cuadro 43. Número kappa determinado por espectrofotometría de la pulpa de raquis de banano seca previamente deslignificada por cocción alcalina. ....	104
Cuadro 44. Valor de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación determinadas por lenguaje PYTHON. ....	105
Cuadro 45. Número kappa obtenido para cada tiempo de deslignificación según modelo cinético. ....	105
Cuadro 46. Determinación de cantidad de hidróxido de sodio consumido durante reacción de deslignificación. ....	110
Cuadro 47. Balance de masa del sistema de deslignificación de 150 g raquis de banano durante 130 minutos. ....	110
Cuadro 48. Balance de energía del sistema de deslignificación de raquis de banano. ....	111
Cuadro 49. Evaluación de costos de electricidad durante proceso de deslignificación. ....	112

Cuadro 50. Evaluación de costos de consumo de hidróxido de sodio durante cocción alcalina de 150 g de raquis previamente triturado y prensado.....	113
Cuadro 51. Evaluación de costo de agua consumida durante cocción alcalina de 150 g de raquis previamente triturado y prensado.....	113
Cuadro 52. Costo total de producción de pulpa celulósica por desintegración alcalina de 150 g de raquis de banano a diferentes tiempos de cocción y carga de hidróxido de sodio.....	114
Cuadro 53. Referencia técnica de secador industrial en laboratorio de operaciones unitarias.....	116
Cuadro 54. Referencia técnica de balanza analítica en laboratorio de operaciones unitarias.....	116
Cuadro 55. Referencia técnica de balanza industrial.....	117
Cuadro 56. Referencia técnica de termobalanza utilizada para determinación de humedad con base húmeda en muestras.....	117
Cuadro 57. Referencia técnica de horno utilizado durante cocción alcalina con NaOH.....	118
Cuadro 58. Referencia técnica de espectrofotómetro utilizado para análisis de Número Kappa.....	118
Cuadro 59. Datos técnicos de Etanol utilizado en Extracción Soxhlet.....	118
Cuadro 60. Datos técnicos de Tolueno utilizado en Extracción Soxhlet.....	119
Cuadro 61. Datos técnicos de Hidróxido de Sodio utilizado en cocción alcalina.....	119
Cuadro 62. Datos técnicos de Permanganato de Potasio utilizado en análisis de número Kappa.....	119
Cuadro 63. Datos técnicos de Ácido acético utilizado en método de cuantificación de $\alpha$ -celulosa.....	120
Cuadro 64. Vernier para determinación de propiedades geométricas.....	120
Cuadro 65. Manta de calentamiento para extracción Soxhlet.....	120
Cuadro 66. Datos técnicos de Ácido sulfúrico.....	121
Cuadro 67. Datos técnicos de Ácido clorhídrico utilizado en determinación de hidróxido de sodio residual en licor de deslignificación.....	121

## Lista de figuras

Figura 1. Selectividad de disolución de carbohidratos y lignina en pulpeo Kraft de madera.....	6
Figura 2. Modelo estructural de lignina en madera aserrada.....	7
Figura 3. Estructuras de monolignoles encontrados en estructura de lignina.....	8
Figura 4. Autooxidación de Lignina.....	9
Figura 5. Estructura molecular de la celulosa.....	10
Figura 6. Espectro ATR-IR de pulpa celulósica y fibras de celulosa regeneradas.....	10
Figura 7. Espectro de absorción FTIR para $\alpha$ -D-Glucosa y $\beta$ -D-Fructosa.....	11
Figura 8. Espectro de absorción IR de D-(+)-sacarosa (SDBS).....	11
Figura 9. Mecanismo propuesto para el corte del compuesto celulosa.....	15
Figura 10: Reacciones entre el oxígeno y las estructuras fenólicas de la lignina.....	16
Figura 11: Diagrama de sistema Soxhlet.....	34
Figura 12. Rendimiento de pulpa seca de raquis de banano después de proceso de deslignificación por cocción alcalina.....	48
Figura 13. Número Kappa de pulpa después de proceso de deslignificación por cocción alcalina.....	49
Figura 14. Consistencia de pulpa de raquis de banano después de proceso de deslignificación por cocción alcalina.....	50
Figura 15. Ajuste del modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 8% con software Berkeley Madonna.....	51
Figura 16. Ajuste del modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 10% con software Berkeley Madonna.....	52
Figura 17. Espectro IR de $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de primera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.....	98
Figura 18. Espectro IR de $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de segunda muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.....	99
Figura 19. Espectro IR de $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de tercera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.....	100
Figura 20. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH del 8% obtenido en Google Colab.....	106
Figura 21. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH del 10% obtenido en Google Colab.....	106

Figura 22. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH de 12% obtenido en Google Colab .....	106
Figura 23. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 8% obtenido con Google Colab.....	107
Figura 24. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 10% obtenido con Google Colab. ....	108
Figura 25. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 12% obtenido con Google Colab. ....	109
Figura 26. Diagrama de balance de masa para deslignificación de 150 g de raquis de banano durante 130 minutos a escala laboratorio.....	111
Figura 27. Diagrama de balance de energía para deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio .....	112
Figura 28. Diagrama de proceso completo de deslignificación de 1 700 g de raquis de banano para elaboración de láminas secas de pulpa celulósica.....	115
Figura 29. Almacenamiento de raquis de banano previo a trituración.....	122
Figura 30. Raquis de banano triturado y prensado en bandejas para ingreso a secador industrial. ....	122
Figura 31. Trozos de raquis de banano triturado y sin prensar entregado por bananera .....	123
Figura 32. Trozos de raquis de banano triturado y prensado entregado por bananera.....	123
Figura 33. Trozos de raquis de banano triturado, prensado y seco. ....	124
Figura 34. Sistema de extracción Soxhlet Etanol Tolueno.....	124
Figura 35. Desintegración de raquis de banano con Hidróxido de Sodio para determinación de $\alpha$ -celulosa .....	125
Figura 36. Desintegración de pulpa con ácido sulfúrico para determinación de porcentaje de Lignina Klason según método TAPPI-T222.....	125
Figura 37. Pulpa previo a proceso de deslignificación.....	126
Figura 38. Pulpa resultante del proceso de cocción alcalina con Hidróxido de Sodio .....	126
Figura 39. Licor de cocción obtenido después de proceso de deslignificación de pulpa .....	127
Figura 40. Pulpa seca después de proceso de deslignificación de raquis de banano.....	127
Figura 41. Fibra de raquis de banano analizadas en microscopio después de proceso de deslignificación. ....	128
Figura 42. Espectrómetro utilizado durante determinación de número Kappa de deslignificación .....	128
Figura 43. Solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico previo a oxidación para determinación de método Kappa.....	129
Figura 44. Resultado de reacción de oxidación de lignina con permanganato de potasio en medio ácido. ....	129

Figura 45. Determinación de pH de caldo de cocción obtenido del proceso de deslignificación .....	130
Figura 46. Método estandarizado Tappi – T240 de consistencia de pulpa .....	131
Figura 47. Método estandarizado para medición de número Kappa por valoraciones Tappi – T236.....	132

## Resumen

La industria agrícola de banano representa un alto porcentaje de las exportaciones en Guatemala, sin embargo, estas plantaciones tienen un alto porcentaje de residuos, entre los que figura el raquis, el cual tiene una producción de 16, 872.8 toneladas anuales. Este residuo actualmente se utiliza como abono de riego de los cultivos, sin embargo, no existen investigaciones actualizadas de las propiedades de este producto para la elaboración de pulpa celulósica con las especies cultivadas en el país. Es por ello que en esta investigación se evaluó el proceso de deslignificación de raquis de banano por método alcalino para la producción de pulpa celulósica para determinar la concentración y tiempo de cocción adecuados. Para llevar a cabo esta evaluación se determinaron las características lignocelulósicas del residuo previo a la deslignificación. Se determinó que este contiene  $13.89 \pm 0.03304$  % (m/m) de lignina,  $71.23 \pm 0.05825$  % (m/m) de  $\alpha$ -celulosa,  $10.90 \pm 0.03479$  % (m/m) de extraíbles y una humedad en base húmeda total de  $86.54 \pm 0.03828$  % (m/m). Continuando con la evaluación del proceso, se determinó la calidad de la pulpa celulósica deslignificada a partir de la biomasa, obteniendo resultados de rendimiento con base seca en un rango entre  $29.8 \pm 0.0135$  % y  $55.9 \pm 0.0102$  %, consistencia un rango entre  $22.33 \pm 1.97$  % y  $36.38 \pm 3.35$  % (m/m) y número kappa de deslignificación en un rango de  $29.32 \pm 0.9426$  y  $42.41 \pm 0.1232$ . Adicionalmente, se construyó un modelo cinético que describe el proceso de deslignificación y oxidación de lignina durante la determinación del número kappa para el sistema de producción de pulpa celulósica a escala laboratorio. De esta forma, se logró determinar que es posible obtener pulpa celulósica con cuando el rango de deslignificación se mantiene entre una carga de 8-10 g de hidróxido de sodio por 100 g de pulpa y tiempos de deslignificación entre 100 y 130 minutos a temperatura constante, para garantizar que el rendimiento, consistencia y número kappa se mantendrán en niveles medios adecuados, al obtener resultados de consistencia entre 20-40 %, rendimientos entre 40-50 % y número kappa entre 20-40, lo que pertenece a madera blanda para blanqueamiento según estándares Tappi.

# I. Introducción

El banano es la fruta de mayor presencia en regiones tropicales y subtropicales en el mundo, representando alrededor de 8.8 millones de hectáreas cultivadas. La industria del banano en Guatemala incrementa el producto interno bruto y las relaciones exteriores respecto a productos de exportación. Las empresas bananeras ocupan un lugar importante en la economía ya que son industrias fuertes en el sector de la costa suroccidental, así como en la costa norte del país.

Las plantaciones de banano producen gran cantidad de residuos de biomasa que podrían ser utilizados como materia prima. Entre estos residuos se encuentra el raquis, el cual es la parte de la planta de banano que da soporte al fruto. Actualmente este residuo se devuelve a la tierra en forma de abono.

Se han estudiado las características físicas, químicas y morfológicas de diferentes especies de banano, determinando que estas son bajas en contenido de lignina, la cual es un polímero abundante en la naturaleza y se encarga de dar soporte mecánico para la unión de las fibras dentro de las plantas, también juega un rol importante al impedir la degradación por enzimas en la pared celular de la planta. Debido a la alta producción y accesibilidad a las plantaciones de banano en Guatemala, se puede evaluar las características del raquis para la producción de pulpa con alto porcentaje de celulosa. Se conoce que la producción de pulpa puede ser posible con un proceso de deslignificación, en donde se degrada y solubiliza la lignina por medio de una cocción utilizando hidróxido de sodio como medio alcalino.

En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar el proceso de deslignificación de raquis de banano con las características del residuo previo a la reacción y la calidad de la pulpa celulósica obtenida. Los resultados se enfocan en el proceso a diferentes concentraciones de solución alcalina y tiempo de reacción para la desintegración de la fibra. Además, se evaluó la reacción de deslignificación con un modelo matemático que se ajusta a la cinética de la reacción. Con las conclusiones se pretende contribuir al sector agroindustrial del país, al aprovechamiento de residuos y la reducción de la emisión de metano al ambiente.

## II. Objetivos

### A. GENERAL

Evaluar el proceso de deslignificación por método alcalino para la producción de pulpa celulósica usando el raquis de banano, para determinar la concentración y tiempo de deslignificación adecuados comparando el grado de deslignificación y consistencia de la pulpa obtenida.

### B. ESPECÍFICOS

1. Realizar análisis fisicoquímicos de humedad, concentración de extraíbles orgánicos solubles en etanol y tolueno, concentración de lignina y  $\alpha$ -celulosa en el raquis de banano, previo a la deslignificación, para establecer las características iniciales del residuo.
2. Determinar el rendimiento de pulpa celulósica deslignificada a partir de la biomasa, utilizando cocción alcalina variando la concentración de hidróxido de sodio y tiempo de deslignificado para reducir la concentración de lignina en el producto final.
3. Evaluar la pulpa celulósica deslignificada realizando pruebas de consistencia y grado de deslignificación para definir los efectos de la remoción de lignina en estas variables y proponer un modelo cinético del proceso de deslignificación a diferentes condiciones para determinar el comportamiento de la reacción durante el tiempo de cocción.

### III. Justificación

Según el Instituto Nacional de Estadística de Guatemala (INE), para el año 2019 el cultivo de banano ocupaba una superficie total de 24,104 hectáreas dentro del territorio nacional, siendo el 7.2 % de las exportaciones agropecuarias del país y según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Guatemala es uno de los principales países exportadores de banano, con un promedio de 2,494,000 toneladas durante el año 2019. Sin embargo, aunque se trata de un cultivo importante, este produce gran cantidad de residuos, entre los que se puede mencionar el raquis de la planta de banano. Actualmente, no se le da uso específico a este residuo, más que abono para la tierra.

La especie de banano principal en Guatemala es del grupo *Cavendish*, del que se pueden obtener aproximadamente 0.7 toneladas por hectárea como residuo (Gallo *et al*, 1972). De modo que, teniendo 24,104 hectáreas plantadas, se obtiene un promedio de 16,872.8 toneladas de raquis al año. Se ha demostrado que este residuo puede aprovecharse para la obtención de pulpa celulósica por una reacción de deslignificación, en donde se degrada la fibra para la obtención de un residuo suave con bajas concentraciones de lignina, la cual es el polímero que forma parte esencial de la estructura de las plantas y permite su dureza.

En Guatemala, el raquis es utilizado como donador de nutrientes al cultivo durante su descomposición, por lo que se tritura y esparce aleatoriamente sobre los surcos del cultivo, sin embargo, esto no representa un beneficio económico directo para la industria y es una fuente de emisión de metano. Por lo tanto, este estudio se enfoca en el aprovechamiento de las propiedades lignocelulósicas y semileñosas de este residuo para la obtención de una pasta celulósica.

El estudio se llevó a cabo con el objetivo de proporcionar datos técnicos acerca de las características del raquis de banano producido en Guatemala y su deslignificación, ya que actualmente la cantidad de información acerca del efecto de las concentraciones de hidróxido de sodio y tiempos de reacción es escasa para el residuo en el país. El análisis de la pasta celulósica resultante provee información importante para la evaluación y aplicación en procesos de dureza, blanqueamiento y otras propiedades de la pulpa como color y cantidad de lignina disponible. Al ser viable la aplicación del raquis de banano como materia prima sustituta para las fibras maderables, este contribuiría a la disminución de residuos generados por la actividad agrícola de este cultivo, reducción de metano, oportunidades de negocio y agregaría un valor económico directo a la agroindustria. En resumen, se contribuiría al desarrollo sostenible al proponer una alternativa para el uso responsable de un residuo.

## IV. Marco teórico

### A. Proceso de pulpeo

La pulpa para elaboración de papel o cartón consiste en fibras, usualmente provenientes de madera. El proceso de pulpeo puede llevarse a cabo a través de dos métodos: el método mecánico y el método químico. El proceso de pulpeo mecánico requiere mayor consumo de energía eléctrica, sin embargo, permite el uso del material completo. Por otro lado, en el método químico, solamente la mitad de la madera se convierte en pulpa completamente, la otra parte se pierde en disolución. La pulpa obtenida puede decolorarse para remoción de impurezas y mejor contraste en el papel dependiendo del proceso de pulpeo. En la manufactura de pulpa, es necesario remover la lignina y extraíbles de la madera, dejando primariamente los carbohidratos, celulosa y hemicelulosa. (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

#### 1. Pulpeo mecánico

Este proceso consiste en obtener la pulpa a través de una molienda de la madera o astillas. Durante el proceso es posible la pérdida de carbohidratos y extractos, sin embargo, en general, el rendimiento de la pulpa es alto, aproximadamente se encuentra entre 90% a 100% dependiendo del equipo utilizado y el método empleado. Las fibras de pulpa mecánica son rígidas, tienen una alta porción de fibras más pequeñas y rotas que son importantes para las propiedades ópticas de la fibra (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

#### 2. Pulpeo químico

Este proceso consiste en la extracción de la mayor cantidad de Lignina en las fibras de la madera. La deslignificación de la madera se lleva a cabo degradando las moléculas de lignina, se mantienen los fragmentos de lignina en solución y eventualmente se remueven por lavado. Aproximadamente la mitad del material maderoso se disuelve en el pulpeo químico. El pulpeo químico puede provocar serios daños a los carbohidratos, por lo tanto, para evitar el daño la mayoría de los procesos no deslignifican por completo la pulpa. La cantidad de lignina restante en la pulpa puede determinarse a través del número kappa de la pulpa. Las fibras obtenidas con el pulpeo químico son más flexibles que las fibras obtenidas a través del pulpeo mecánico, se ajustan mejor para formar el papel y ofrecen buenas propiedades de resistencia. El proceso químico puede ser tanto continuo o por lotes (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009)

Los procesos de pulpeo químico más utilizados son el pulpeo Kraft de sulfato y el proceso alcalino con soda. En ambos, la madera se cocina con hidróxido de sodio con el propósito de disolver la lignina que mantiene juntas las fibras. Los procesos se nombran dependiendo de los químicos de regeneración utilizados para compensar por el hidróxido de sodio. El proceso con soda es de gran importancia para la producción de fibras no maderosas (Bajpai, 2012).

#### a. Pulpeo Kraft

La cocción Kraft es el método de pulpeo dominante globalmente. El nombre se deriva de la palabra Alemana y Suiza que significa fuerza. Los químicos utilizados para la cocción son hidróxido de sodio y sulfito de sodio. El licor de cocción será blanco y consistirá en especies de cocción activas  $\text{OH}^-$  y  $\text{HS}^-$ . El sulfuro de hidrógeno es el principal agente deslignificante, el hidróxido de sodio se encarga de mantener los fragmentos de lignina en solución. La pulpa Kraft se refiere a todas las pulpas procesadas con sulfato, el producto obtenido tiene bajo contenido de lignina y alta calidad blanqueable (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

Las pulpas Kraft se utilizan generalmente para la producción de papel imprimible en masa como mezcla con pulpas de madera blanda. Este proceso es el más utilizado en la industria de producción de papel y cartón hoy en día. Generalmente, una planta de pulpeo Kraft tiene una capacidad de 500,000 ton/año. Una planta procesadora de papel nueva tiene un costo aproximado de un billón de dólares, lo que representa aproximadamente un millón de dólares por empleado. Por lo tanto, la pulpa Kraft es comprada principalmente en el mercado por los fabricantes de papel en lugar de estar integrado verticalmente en la producción (Bajpai, 2012).

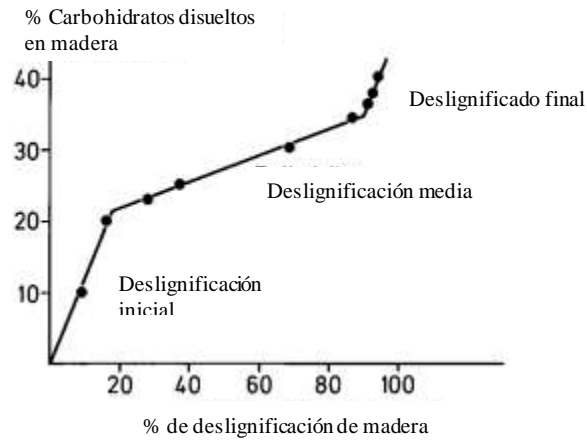
#### B. Selectividad de deslignificación

La selectividad de disolución de los carbohidratos y lignina durante la cocción Kraft procede en tres fases distintas, la primera es la extracción de ambos tipos de componentes. Cuando alrededor del 20% de los componentes se ha diluido, la cinética cambia y comienza una disolución de lignina selectiva hasta que aproximadamente 90% de la lignina se ha disuelto. Durante la fase final, la porción de lignina residual es difícil de remover y solamente puede llevarse a cabo con la pérdida de carbohidratos (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

La pérdida de carbohidratos durante el pulpeo Kraft se debe a que la mayoría de hemicelulosa se degrada y se disuelve en el licor alcalino. El glucomannan es rápidamente disuelto independientemente de la concentración de la solución alcalina (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

Altas temperaturas (mayor a 100 °C) y aumento de la carga alcalina pueden tener un impacto negativo en la selectividad, particularmente al final de la deslignificación. La degradación de celulosa con las fibras es causada por los radicales de oxígeno generados por las reacciones con la lignina y la reducción de las especies de oxígeno durante el proceso. (McDonough T. , 1992)

Figura 1. Selectividad de disolución de carbohidratos y lignina en pulpeo Kraft de madera

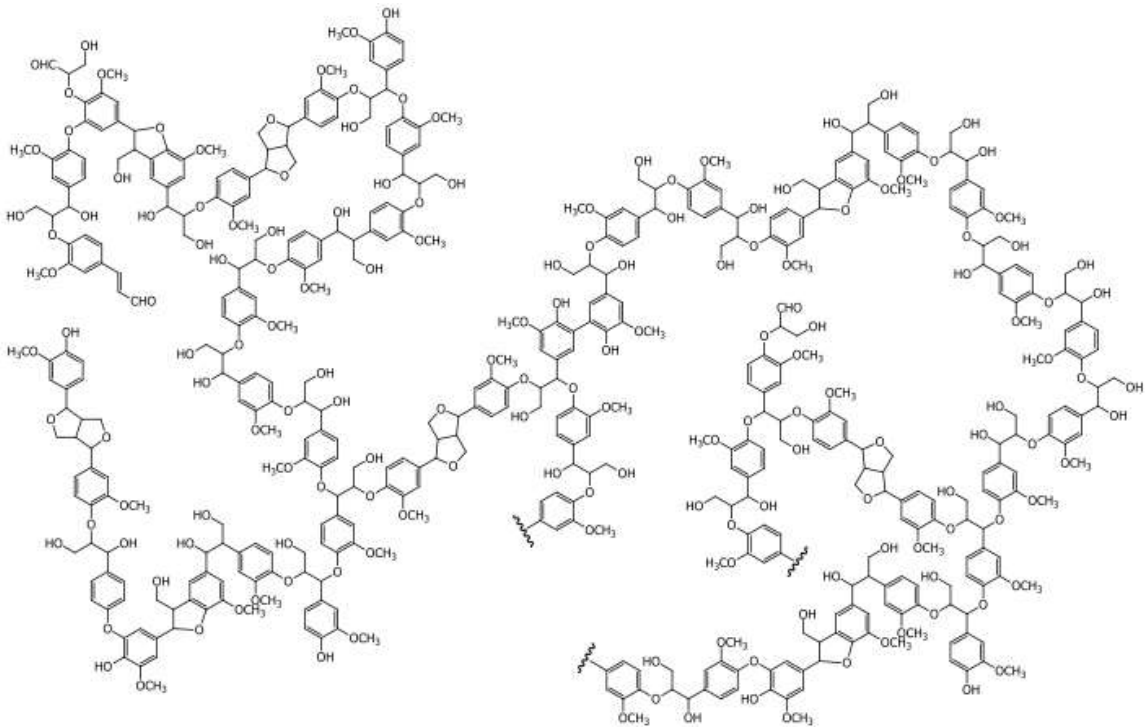


(Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009)

### C. Propiedades de la lignina

La definición estructural de la lignina no es tan clara como la de otros polímeros naturales como la celulosa, debido a la complejidad de su aislamiento, análisis de composición y caracterización estructural. Es difícil encontrar una definición exacta para esta macromolécula debido a sus múltiples unidades estructurales, esta variará dependiendo de su origen y método de extracción o aislamiento. (Lu & John, 2010). Los investigadores usualmente utilizan anillos fenólicos, estructuras bifenólicas, y compuestos como el guayacol, siringaldehído y veratraldehído como compuestos modelo para representar a la lignina. (Argyropoulos, Akim, & Ahazi, 2002)

Figura 2. Modelo estructural de lignina en madera aserrada



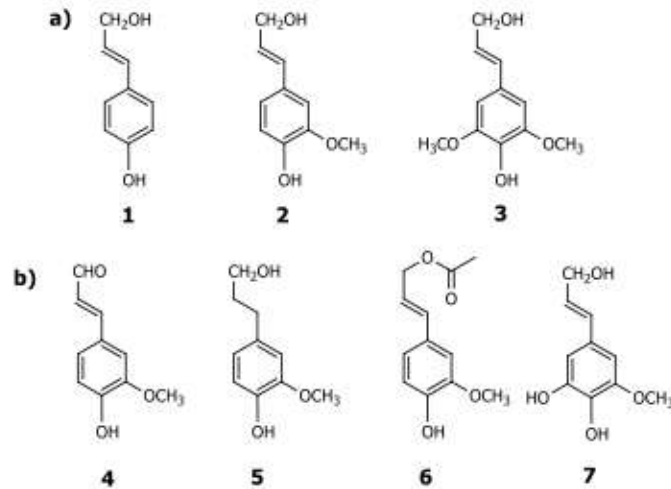
(Chávez & Domine, 2013)

La lignina es un polímero vegetal constituido a base de unidades de fenilpropanoides, presenta la mayor parte de los grupos metoxilo contenidos en la madera, son resistentes a la hidrólisis ácida, se oxidan fácilmente, solubles en bisulfito o álcalis caliente, condensable con fenoles o tioles y al reaccionar con nitrobenzeno en solución alcalina pueden producir vainillina, siringaldehído y p-hidroxibenzaldehído. (Lu & John, 2010)

Las ligninas son copolímeros que se derivan de tres unidades fenilpropanomonoméricas básicas: alcohol p-cumarílico coniferílico y alcohol sinapílico. Por lo tanto, estas se consideran mezclas racémicas. En la Figura 3 sección a se muestran los diferentes tipos de monolignoles comunes encontrados en la construcción de lignina: 1. alcohol p-cumarílico, 2. Alcohol coniferílico, 3. Alcohol sinapílico y en la sección b se muestran otros monolignoles de menor presencia: 4. Coniferaldehído, 5. Alcohol dihidroconiferílico, 6. Alcohol coniferil-9-acetato, 7. Alcohol 5-hidroxiconiferílico (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

Estos monolignoles obtenidos por medio de reacciones catalizadas por enzimas dentro de las estructuras vegetales al reaccionar en la pared celular finalmente logran formar polímeros de lignina. El alcohol coniferílico es el monolignol más común en maderas blandas representando aproximadamente 95% de los monolignoles presentes, mientras que en las maderas duras existen en mayor proporción los alcoholes coniferílicos y sinapílicos (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

Figura 3. Estructuras de monolignoles encontrados en estructura de lignina



(Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009)

Se puede inferir que entre menor cantidad de monolignoles en una madera, menor proporción de lignina tendrá y su aplicación en la industria papelera será diferente (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

En la deslignificación química se ha demostrado claramente que una fragmentación de la lignina polimérica y la introducción de grupos hidrófilos son requisitos previos necesarios para la disolución. Las reacciones predominantes tienen lugar en el enlace que conecta las unidades de fenilpropano juntas, el enlace  $\beta$ -O-4. Por la acción de los iones hidrosulfuro, las estructuras fenólicas de  $\beta$ -O-4 se fragmentan en gran medida. Si no hay iones de hidrosulfuro presentes, como en la cocción con hidróxido de sodio, la tasa de deslignificación es menor (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

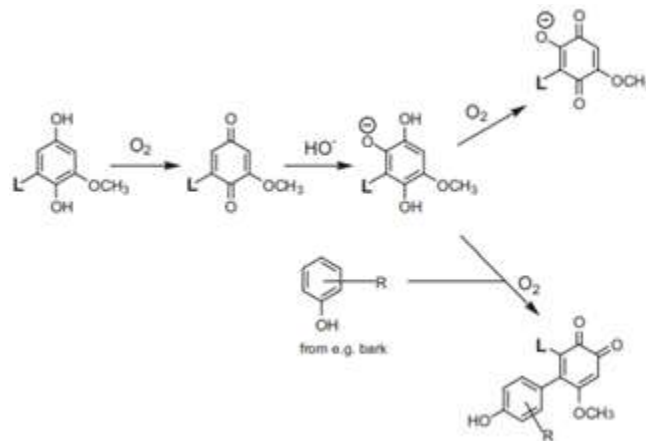
#### 1. Color de la madera

La mayoría de las especies de madera tienen un color desde amarillo hasta café, este color es producido principalmente por las estructuras de lignina. Adicionalmente, la corteza tiene una variedad de componentes activos que contribuyen directa o indirectamente al color. En el pulpeo mecánico, el brillo de la madera es importante porque se ha demostrado que de una madera brillante se obtiene madera brillante. La presencia de componentes fenólicos tanto en la corteza como en la madera hacen que la pulpa sea susceptible a la presencia de iones de metales de transición y complejos de iones de fenol-metal (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

## 2. Grupos reactivos en la lignina

La lignina contiene varios grupos hidroxilo fenólicos libres. Adicionalmente, la lignina también contiene trazas de hidroquinona y estructuras de catecol. Estas dos partes son de interés particular porque ambos pueden convertirse en las estructuras quinonas correspondientes al exponerse a oxígeno. En presencia de agua en condiciones alcalinas, la estructura quinona primaria reaccionará con el oxígeno produciendo otros tipos de quinonas. Si los constituyentes fenólicos, como fenoles, también están presentes, la combinación de autooxidación y condensación de fenoles puede formar nuevas estructuras unidas a la lignina (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

Figura 4. Autooxidación de Lignina



(Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009)

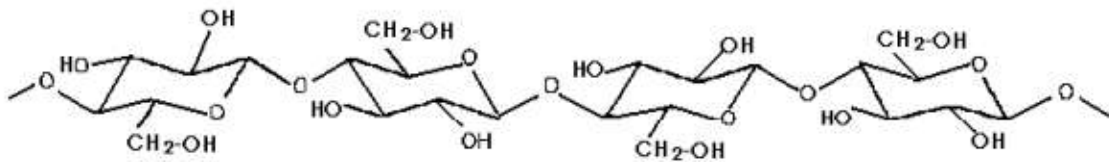
En esta figura se muestra como la estructura de la lignina hidroquinona se oxida y la conversión del producto en una quinona hidroxilada o quinona condensada en presencia de oxígeno, agua y, en este último caso un reactivo fenol. Las reacciones son catalizadas por la presencia de iones de metales de transición y avanzan más rápidamente a un pH alcalino (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009).

La conversión de la madera a pulpa se lleva a cabo a altas temperaturas, entre 140-170°C, usualmente en dos etapas de refinado. Bajo estas condiciones, nuevos compuestos cromóforos se forman en la lignina. Por lo tanto, el número de estructuras de doble enlace y carbonilo conjugado en la lignina aumenta como resultado del refinamiento. Adicionalmente, el número de grupos hidroxilo fenólicos libres aumenta debido a la reacción homolítica de las estructuras de la lignina. Adicionalmente, se forman grupos  $\alpha$ -carbonilo (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009)

## D. Propiedades de la celulosa

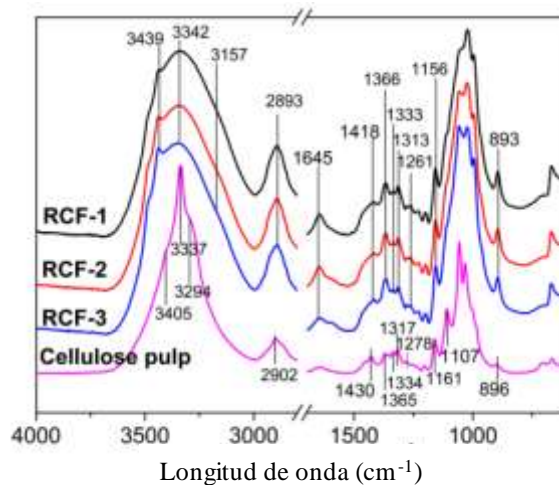
La celulosa es el componente mayoritario en los materiales lignocelulósicos. Esta es la base estructural de las células vegetales. La ecuación química de la celulosa es  $(C_6H_{10}O_5)_n$  y es un homopolímero lineal estructurado por unidades de  $\beta$ -glucosa unidas por enlaces 1-4. La configuración más estable de la celulosa es la forma de silla con los grupos hidroxilos en posición ecuatorial. Los grupos O-H se encuentran posicionados en los extremos de la cadena, mientras que otros grupo O-H del carbono 1 que se encuentra en los extremos es un grupo aldehído y el grupo O-H en el carbono 4 situado al opuesto de la cadena es un grupo hidroxil alcohol no reductor (Fengel & Wegener, 1984). Para comparar el espectro IR de la celulosa, también se muestran los espectros de fructosa, glucosa y sacarosa

Figura 5. Estructura molecular de la celulosa



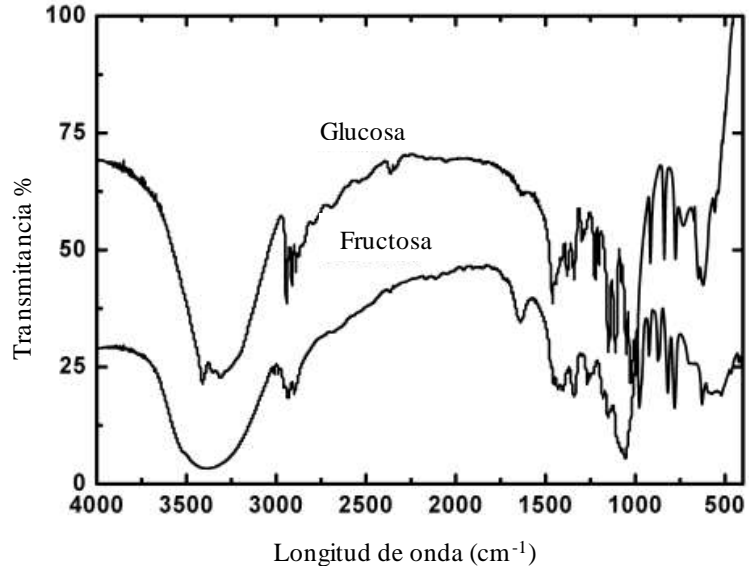
(Fengel & Wegener, 1984)

Figura 6. Espectro ATR-IR de pulpa celulósica y fibras de celulosa regeneradas



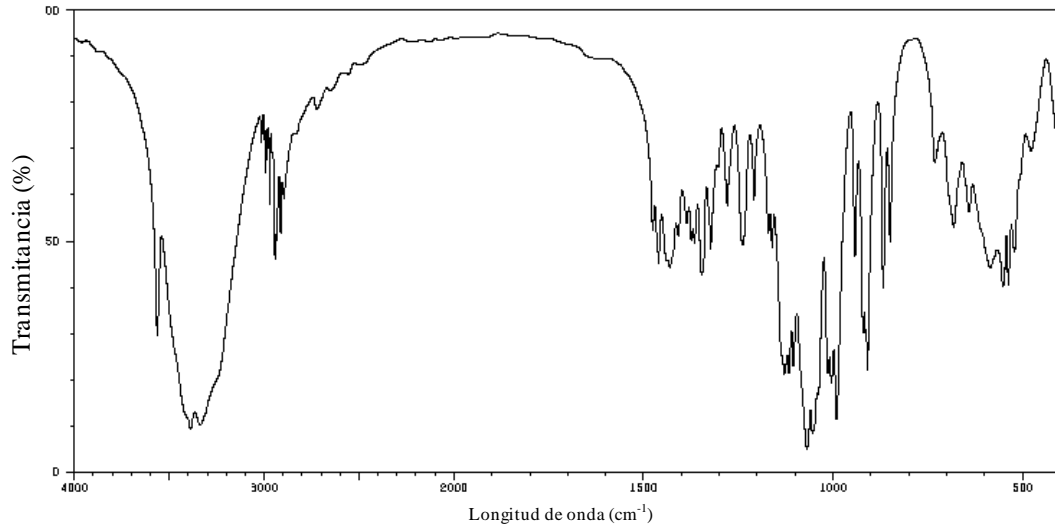
(Yang, Zhang, Lang, & Yu, 2017)

Figura 7. Espectro de absorción FTIR para  $\alpha$ -D-Glucosa y  $\beta$ -D-Fructosa

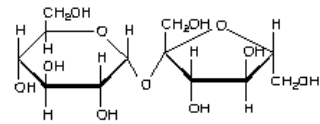


(Ibrahim , Alaam, El-Haes, Jalbout, & de Leon, 2006)

Figura 8. Espectro de absorción IR de D-(+)-sacarosa (SDBS)



3663	26	1430	49	1137	24	1006	18	850	47
3388	8	1375	49	1128	20	991	11	587	42
3337	10	1368	47	1116	20	943	44	558	43
2943	44	1347	41	1106	22	921	29	552	38
2933	49	1323	46	1068	4	915	29	547	42
1460	43	1239	47	1054	8	909	21	538	38
1439	44	1161	47	1014	20	868	38	522	46



## E. Reacciones de degradación

Durante la deslignificación las fracciones de lignina se remueven antes de la conversión bioquímica de la biomasa, durante este proceso también se remueve la hemicelulosa inevitablemente, este proceso puede llevarse a cabo en un medio ácido en un medio básico (Chen & Wang, 2017). Durante la degradación de lignina, existen tres etapas en donde se rompen los enlaces dentro de la molécula para obtener moléculas más simples, siendo este un proceso de despolimerización, sin embargo, pueden existir reacciones secundarias de condensación que tienen un efecto negativo. La degradación va a depender del ataque a enlaces tipo  $\alpha$ -aril éter,  $\beta$ -aril éter y la formación de grupos carboxilos (Ragauskas, 2005).

El proceso de deslignificación consta de tres etapas: inicial, bulk y residual. Durante la primera etapa se degradan las estructuras fenólicas y carbonilo, lo que representa un 20% de la reacción total. En la etapa bulk se elimina la mayor parte de la lignina y se atacan las estructuras no fenólicas, esta etapa es la más lenta. Por último, en la etapa residual se llega a una degradación de los carbohidratos (Ragauskas, 2005).

### 1. Reacciones de degradación durante el tratamiento alcalino

En el proceso de cocción alcalina, las macromoléculas de lignina se rompen en moléculas más pequeñas, las cuales pueden ser disueltas en el solución. Por lo tanto, el proceso de deslignificación alcalina es la reacción de inicio para varios enlaces entre las unidades de macromoléculas de lignina. Los enlaces principales en las estructuras unitarias de lignina son enlaces de éteres, así como enlaces carbono-carbono y enlaces de ésteres. Durante la cocción alcalina, se llevan a cabo varias reacciones (Chen & Wang, 2017):

### 2. Fractura de los enlaces entre el éter $\alpha$ -aril fenólico y el éter $\alpha$ -alquilo.

Estos enlaces son fáciles de romper. Durante el pretratamiento, el ion  $\text{OH}^-$  y el grupo hidroxilo fenólico reaccionan uno con el otro y el ion fenóxido generado es reorganizado para facilitar el rompimiento del oxígeno y  $\alpha$ -C en un enlace éter y fenilpropano. Las moléculas de lignina se convierten en moléculas más pequeñas después del rompimiento del enlace éter  $\alpha$ -alquilo y el enlace  $\alpha$ -aril éter dependiendo de estructuras específicas. Por ejemplo, después del rompimiento de los enlaces  $\alpha$ -aril éter y enlaces  $\alpha$ -alquil éter en la estructura fenilcumarina y estructura de pinosinol, las moléculas de lignina no se hacen más pequeñas. El enlace de éter  $\alpha$ -arílico no fenólico es muy estable (Chen & Wang, 2017).

### 3. Ruptura de los enlaces fenólicos $\beta$ -aril éter.

La reacción principal durante el tratamiento alcalino de los enlaces  $\beta$ -aril éter es la reacción de eliminación del protón  $\beta$  y el  $\beta$ -formaldehído. En consecuencia, la mayoría de los enlaces no pueden romperse a menos que exista la formación de epóxido con la reacción nucleofílica entre el ion  $\text{OH}^-$  y los átomos de carbono  $\alpha$  (rompimiento alcalino). En la industria de pulpa de papel, se aplica la digestión con sulfato, en donde los iones  $\text{HS}^-$  o  $\text{S}^{2-}$  muestran alta electronegatividad, así como el ataque nucleofílico, por lo tanto, los enlaces  $\beta$ -aril éter se rompen fácilmente tras la formación de sulfuro cíclico (Chen & Wang, 2017).

#### 4. Ruptura de los enlaces no fenólicos $\beta$ -aril éter

Los enlaces  $\beta$ -aril éter son muy estables y solamente pueden romperse bajo las siguientes condiciones: (1) Si los enlaces  $\beta$ -aril éter no fenólicos están conectados en el  $\alpha$ -hidroxilo, este puede fácilmente ionizarse en el licor alcalino para generar iones de oxígeno que atacan los átomos de carbono  $\beta$  para formar epóxidos, los cuales facilitan la fractura de los enlaces  $\beta$ -aril éter. (2) Cuando  $\alpha$ -hidroxilo existe junto con el enlace no fenólico  $\beta$ -aril éter, este puede facilitar la formación de sulfuros y estos permitir el rompimiento de los enlaces  $\beta$ -aril éter (Chen & Wang, 2017).

#### 5. Ruptura de los enlaces aril-alquil/ alquil-alquil carbono-carbono

Los enlaces aril-aril carbono-carbono son bastante estables. Estos enlaces carbono-carbono deben romperse bajo condiciones específicas, llevando a cambios específicos en la molécula de lignina. Estas reacciones raramente ocurren en el pretratamiento alcalino (Chen & Wang, 2017).

#### 6. Reacción de condensación durante el tratamiento alcalino a altas temperaturas

La condensación de  $C\alpha$ - $A\gamma$  es la reacción dominante afectando la disolución de lignina. Esta reacción comienza desde la estructura metilen-quinona. Cuando el hidróxido de sodio es suficiente, ocurre la deslignificación; cuando el medio alcalino no es suficiente, ocurre una condensación. Las reacciones de condensación ocurren entre las fracciones de lignina rotas para formar moléculas de lignina más largas, las cuales son más difíciles de disolver. Otras reacciones de condensación como  $C\beta$ - $C\gamma$  y la condensación entre estructuras fenólicas/productos del rompimiento de enlaces y formaldehído, usualmente ocurren en el licor negro, las cuales tienen poca influencia en la disolución de la lignina (Chen & Wang, 2017).

#### F. Mecanismos de degradación de carbohidratos en el proceso alcalino

Bajo condiciones alcalinas ocurre una degradación de la celulosa y hemicelulosa (Chen & Wang, 2017).

##### 1. Reacción de la celulosa

###### a. Reacción de escamación

Los grupos reductores en los extremos de la glucosa se eliminan. En condiciones alcalinas, el extremo reductor no es estable y se elimina de la celulosa molecular por una reacción de eliminación por  $\beta$ -alcoxi (Chen & Wang, 2017).

###### b. Reacción final

Los grupos reductores inestables se convierten en estables al convertirse en celulosa variante  $\alpha$ -parcial o  $\beta$ -parcial (Chen & Wang, 2017).

c. Hidrólisis alcalina de la celulosa

Bajo las condiciones de alta temperatura y solución alcalina fuerte, las macromoléculas de celulosa se romperán en dos o más moléculas y el extremo reductor aumenta, lo que promueve la reducción de escamación (Chen & Wang, 2017).

d. Reacción del grupo acetil

Bajo altas temperaturas y un medio alcalino fuerte, se da una reacción de desacetilación, la cuál es la reacción más rápida y completa (Chen & Wang, 2017).

e. Reacción de hemicelulosa

Bajo altas temperaturas y el medio alcalino fuerte, la actividad de la hemicelulosa es mucho mayor que la de la fibra activa, lo que significa que es fácil de disolver y descomponer. La estructura de la hemicelulosa cambia después del tratamiento, porque el xilano es más estable que la manosa y polidextrosa en la solución alcalina, su rendimiento de degradación es menor (Chen & Wang, 2017).

f. Respuesta y retención de la xilanas

La cadena del ácido 4-O-metilglucurónico de la xilanas molecular se remueve total o parcialmente, por lo que el grado de polimerización del polietileno disminuye. Sin embargo, si el xilano tiene una cadena ramificada, las moléculas ramificadas pueden impedir la transferencia del xilano al exterior de la pared celular de la fibra (Chen & Wang, 2017).

g. Ácido hexenurónico (HexA)

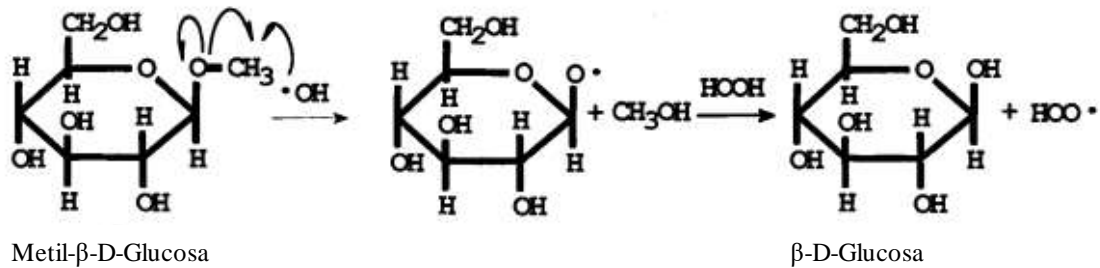
En el tratamiento alcalino, la cadena de xilano del grupo ácido 4-O-metilglucurónico en la hemicelulosa se convierte en ácido 4-deoxi-hexeno-4-urónico. Con la concentración alcalina utilizada, el contenido de HexA decrece (Chen & Wang, 2017).

Los ácidos hexenurónicos se forman a partir de los ácidos metilglucurónicos distribuidos a lo largo de las cadenas de xilano en la superficie de la fibra de la pulpa. Los ácidos metilglucurónicos sufren una eliminación  $\beta$  de un grupo metilo, por lo que liberan metanol y ácido hexenurónico unido a la cadena de xilano, los cuáles permanecerán en la superficie de la fibra. Los ácidos hexenurónicos tienen grupos funcionales enol-éter y ácidos carboxílicos insaturados inertes en condiciones ácidas, sin embargo, estos grupos sufren hidrólisis rápida en condiciones ácidas, produciendo aldehídos, cetonas y alcoholes. Estos ácidos son propensos a un ataque electrofílico y nucleofílico (Petit-Breuilh, Zaror, & Melo, 2004).

h. Curso de la degradación de los carbohidratos en el tratamiento alcalino

La reacción de escamación de los carbohidratos comienza a 100 °C. Con un rango de 100 – 150 °C, la escamación es la reacción predominante. En un rango de 150-160 °C, la reacción de hidrólisis es la más predominante. Durante el tratamiento alcalino, la tasa de degradación de los componentes será diferente: el ácido aldurónico y manosa se disuelven a 100 EC; con un rango de 100-150 °C, se disolverá el ácido aldurónico, manosa, galactosa y arabinosa. La xilosa no se disolverá a menos que se tenga una temperatura mayor a 160 °C (Chen & Wang, 2017).

Figura 9. Mecanismo propuesto para el corte del compuesto celulosa

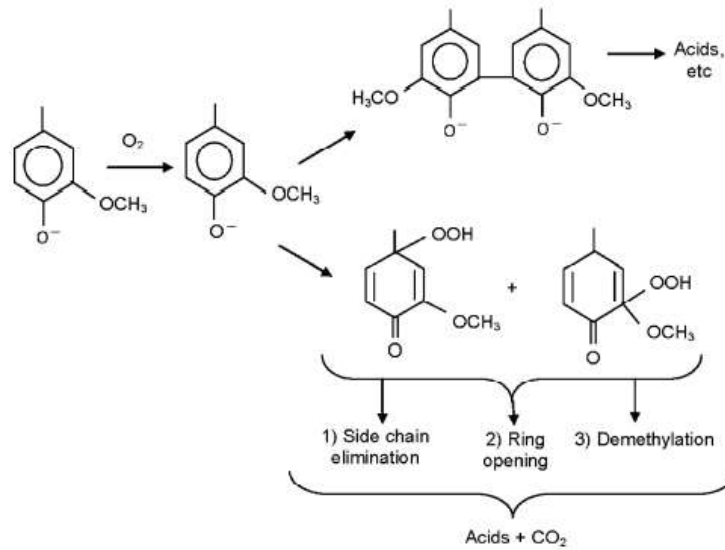


(Guay, Cole, Fort, Genco, & Hausman, 1999)

G. Efecto del oxígeno en la deslignificación

Los grupos fenólicos en la lignina residual de la pulpa han demostrado jugar un rol importante. Los iones fenolato se forman bajo las condiciones alcalinas y estas reaccionan con el oxígeno para producir radicales fenoxilo, los cuales pasan por otra reacción de oxidación para formar un intermediario hidroperóxido. En la figura 4 se muestran las posibles reacciones que incluyen las estructuras de lignina. Una reacción de condensación y la otra reacción de apertura de los anillos aromáticos. El oxígeno se reduce a peróxido de hidrógeno, el cual puede reaccionar con la lignina y carbohidratos. Durante la deslignificación se forman muchos radicales libres como radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) y superóxido ( $\text{O}_2^\cdot$ ) (McDonough, 1990; Gierer y Imsgard, 1977)

Figura 10: Reacciones entre el oxígeno y las estructuras fenólicas de la lignina



(Olm y Teder 1979; Evans *et al*, 1979).

La presencia de iones de metales pesados, en especial hierro, cobalto y cobre, resulta en una apreciable degradación, esto contribuye al efecto de la formación de radicales por la descomposición de peróxidos catalizados por los iones del metal. La adición de sales de magnesio pueden inhibir la degradación, proveyendo un umbral de ion magnesio/metal en exceso. La inhibición por magnesio se atribuye a la habilidad del hidróxido de magnesio, este precipita en solución alcalina después de la adición de una sal de magnesio para absorber iones de metales pesados y sus hidróxidos (Olm y Teder 1979; Evans *et al*, 1979).

## H. Método KAPPA

La lignina residual se expresa en la pulpa en términos del número kappa, el cual se determina por la oxidación de la lignina utilizando permanganato de potasio en medio ácido. Mientras menor sea el número kappa de la pulpa, menor será la cantidad de lignina residual (Bajpai, 2012). Se ha demostrado que el consumo de permanganato por los materiales de la pulpa dependen del radio de permanganato y lignina en la muestra, la concentración de permanganato, la concentración de ácido sulfúrico añadido, el tiempo de reacción, la temperatura y la preparación de la muestra para el método. Estas desviaciones se han corregido al tener condiciones específicas para la oxidación con una concentración de permanganato de potasio fija y ácido sulfúrico, a una temperatura de  $25^\circ C$  y un tiempo de reacción de 10 minutos. Las reacciones entre el permanganato y la lignina no han sido profundamente estudiadas, sin embargo, en 1990, se reportó que los anillos aromáticos de lignina y los modelos de lignina se degradan completamente por el permanganato y que la estructura de la cadena original era estable (Li & Gellerstedt, 1998).

## I. Transferencia de calor

### 1. Convección natural

En la convección natural, cualquier movimiento del fluido ocurre por medios naturales, como la flotabilidad. En esta convección el movimiento del fluido no se puede notar ya que intervienen velocidades muy bajas. Los coeficientes de transferencia de calor que están asociados a la convección natural son más bajos que en la convección forzada. En resumen, la transferencia de calor por convección natural es el calor que resulta de la corriente de aire que resulta del reemplazo continuo del aire calentado que está alrededor del objeto caliente por aire más frío cercano (Cengel & Ghajar, 2011).

La convección natural dependerá de la configuración geométrica de la superficie, así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene (Cengel & Ghajar, 2011).

#### a. Número de Grashof

Este es un parámetro adimensional que representa los efectos de la convección natural. Este representa la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúa sobre el fluido. Este proporciona el criterio principal para determinar si el flujo del fluido es laminar o turbulento en la convección natural. En las placas verticales se observa un número de Grashof de alrededor de  $10^9$ . Con este número se hacen adimensionales las ecuaciones que rigen las condiciones de frontera dividiendo todas las variables dependientes e independientes entre cantidades constantes apropiadas (Cengel & Ghajar, 2011). Este número se utilizó para determinar la pérdida de calor por convección natural en el sistema de cocción alcalina de esta investigación (ver ecuación 22).

#### b. Transferencia de calor por convección natural en cilindros verticales

En un cilindro la superficie exterior se puede tratar como una placa vertical cuando el diámetro del cilindro es lo suficientemente grande, de modo que los efectos de la curvatura son despreciables. La condición se describe en la ecuación 23. Cuando se satisfacen estos criterios, también se pueden usar las relaciones de placas verticales para cilindros verticales (Cengel & Ghajar, 2011).

### 2. Radiación

La radiación térmica se emite como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, átomos y electrones en una sustancia. La temperatura será la medida de la intensidad de estas actividades a nivel microscópico y la rapidez de la emisión de radiación térmica se incrementa al aumentar la temperatura. La radiación no se asume como calor, si no que se refiere a la manifestación de este cuando se absorbe por un cuerpo. En un cuerpo ideal, se absorbe toda la radiación incidente, sin reflejar ni transmitir energía, este se conoce como cuerpo negro. El fenómeno de la radiación se presenta en la ecuación 28 (Cengel & Ghajar, 2011).

## J. Consistencia de pulpa según método Tappi 240

En este método se describe la medición de la consistencia de pulpa (concentración) de mezclas de pulpa - agua. Este se aplica a mezclas de pulpa - agua que contienen más de 25 % m/m de pulpa seca disuelta. En mezclas de pulpa - agua que contienen menos de 1 % m/m de pulpa, el exceso de agua se remueve por filtrado y la pulpa resultante se seca. Para mezclas que contienen entre 1 a 25 % m/m de pulpa, el material pesado se diluye hasta 0.5 % m/m de consistencia o menos, y la consistencia total se determina removiendo el exceso de agua y filtrando la muestra diluida. La consistencia de la pulpa es más apropiadamente la concentración y se define como la masa seca de fibra en gramos por cada 100 gramos de la mezcla de pulpa - agua (Tappi, 1993). El cálculo de la consistencia de la pulpa celulósica se encuentra descrito en las ecuaciones 12 y 13.

## K. Ecuaciones

Ecuación 1. Volumen de raquis de banano sin triturar entregado por bananera.

$$V_1 = \pi \left( \frac{D_i}{D_s} \right)^2 L$$

Descripción:

- $V$  = Volumen de raquis de banano.
- $D_i$  = Diámetro inferior del raquis de banano al proponer una figura geométrica cónica para su modelo. Este se refiere al extremo más ancho del residuo vegetal.
- $D_s$  = Diámetro superior del raquis de banano al proponer una figura geométrica cónica para su modelo. Este se refiere al extremo más angosto del residuo vegetal.
- $L$  = Largo del raquis de banano, partiendo del extremo inferior hasta el extremo superior.

Ecuación 2. Densidad de raquis de banano sin triturar entregado por bananera.

$$\rho = \left( \frac{m}{V_1} \right)$$

Descripción:

- $\rho$  = densidad de raquis de banano
- $m$  = masa de raquis de banano entero o previamente triturado utilizando una balanza
- $V_1$  = Volumen calculado por la ecuación 1 para raquis entero. En el caso de raquis previamente triturado este volumen corresponde a la cantidad de agua desplazada por el material utilizando una probeta graduada.

Ecuación 3. Humedad con base húmeda de raquis de banano

$$\% H = \frac{X}{X + y} * 100$$

Descripción:

- X = masa de agua en la muestra (g)
- Y = masa de raquis de banano seco (g)

Ecuación 4. Humedad con base seca de raquis de banano

$$\% H = \frac{X}{Y} * 100$$

Descripción:

- X = masa de agua en la muestra (g)
- Y = masa de raquis de banano seco (g)

Ecuación 5. Volumen de trozos de raquis de banano previamente triturado prensado y sin pensar entregado por bananera.

$$V_2 = L * A * E$$

Descripción:

- V<sub>2</sub> = volumen de trozos de raquis de banano previamente triturado.
- L = largo de muestra de trozo de raquis previamente triturado.
- A = ancho de muestra de trozo de raquis previamente triturado.
- E = espesor de muestra de trozo de raquis previamente triturado.

Ecuación 6. Cuantificación de la cantidad de extraíbles presentes en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \text{ Extraíbles} = \frac{m_f - (m_f * H_f)}{m_o - (m_o * H_o)} * 100$$

Descripción:

- m<sub>f</sub> = masa de raquis de banano seca al finalizar extracción Soxhlet.
- H<sub>f</sub> = humedad con base húmeda de muestra libre de extraíbles al cumplir 2 horas de secado en horno.
- m<sub>o</sub> = masa inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado al sistema Soxhlet para extracción.
- H<sub>o</sub> = humedad con base húmeda de muestra inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado al sistema Soxhlet para extracción.

Ecuación 7. Cuantificación de  $\alpha$ -celulosa presente en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \alpha\text{-celulosa} = \frac{m_f - (m_f * H_f)}{m_o - (m_o * H_o)} * 100$$

Descripción:

- $m_f$  = masa de  $\alpha$ -celulosa seca al finalizar desintegración con Hidróxido de sodio.
- $H_f$  = humedad con base húmeda de muestra de  $\alpha$ -celulosa al cumplir 2 horas de secado en horno.
- $m_o$  = masa inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado al sistema de desintegración.
- $H_o$  = humedad con base húmeda de muestra inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado a la desintegración.

Ecuación 8. Cuantificación de lignina presente en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \text{Lignina} = \frac{m_f - (m_f * H)}{m_o - (m_o * H)} * 100$$

Descripción:

- $m_f$  = masa de lignina Klason seca al finalizar desintegración con ácido sulfúrico al 72 % v/v.
- $H_f$  = humedad con base húmeda de muestra de celulosa al cumplir 2 horas de secado en horno.
- $m_o$  = masa inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado al sistema de desintegración.
- $H_o$  = humedad con base húmeda de muestra inicial de raquis de banano triturado y prensado, ingresado a la desintegración.

Ecuación 9. Cantidad de hidróxido de sodio agregado durante la deslignificación de raquis de banano por cocción alcalina.

$$\text{Carga de hidróxido de sodio} = m_p * PD$$

Descripción:

- $m_p$  = Masa de pulpa de raquis de banano triturada y seca ingresada al sistema de deslignificación por cocción alcalina.
- $PD$  = Porcentaje de Hidróxido de sodio al que se llevará a cabo la deslignificación.

Ecuación 10. Volumen de agua agregado durante la deslignificación de raquis de banano por cocción alcalina.

$$\text{Volumen de agua} = m_p \left( \frac{1}{\rho} \right) * 8$$

Descripción:

- $m_p$  = Masa de pulpa de raquis de banano triturada y seca ingresada al sistema de deslignificación por cocción alcalina.
- $\rho$  = densidad de pulpa completa de raquis de banano triturado y seco
- El volumen de agua está multiplicado por un factor de 8, ya que la cantidad de agua en proporción con la cantidad de pulpa ingresada es de 8:1.

Ecuación 11. Rendimiento de pulpa después de deslignificación por cocción alcalina.

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{m_d}{m_p} * 100$$

Descripción:

- $m_d$  = Masa de raquis seca y deslignificada egresada del sistema de cocción alcalina.
- $m_p$  = Masa de raquis seca previo a deslignificación ingresada al sistema de cocción alcalina.

Ecuación 12. Consistencia de muestreo de pulpa por metodología TAPPI-T240 después de deslignificación por cocción alcalina.

$$p = \frac{w - f}{g} * 100$$

Descripción:

- $p$  = consistencia de muestreo de 10 porciones del total de pulpa.
- $f$  = masa de papel filtro seco.
- $g$  = peso neto después del muestro de 10 porciones de pulpa.

Ecuación 13. Consistencia total de pulpa por metodología TAPPI-T240 después de deslignificación por cocción alcalina.

$$c = p * \left(\frac{W}{w}\right)$$

Descripción:

- c = consistencia total de pulpa deslignificada por cocción alcalina.
- P = consistencia del muestreo de 10 porciones de pulpa deslignificada.
- W = masa del contenido total de pulpa deslignificada.
- w = masa total del muestreo de 10 porciones de pulpa deslignificada.

Ecuación 14. Número Kappa obtenido por espectrofotometría por reacción de oxidación con permanganato de potasio (Chai & Zhu, 1999).

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

Descripción:

- K = número kappa de pulpa seca y deslignificada por cocción alcalina.
- a = Volumen inicial de permanganato de potasio 0.02 mol/L en la solución blanco.
- w = masa de pulpa seca ingresa a la reacción de oxidación con permanganato de potasio.
- A<sub>0</sub>= Absorbancia del permanganato de potasio inicial a 553 nm previo a la reacción de oxidación.
- A<sub>e</sub>= Absorbancia del permanganato de potasio a 553 nm después de 10 minutos de reacción de oxidación.

Ecuación 15. Modelo cinético propuesto para reacción de deslignificación de pulpa de raquis de banano previamente triturado y seco.

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n_1} + k_2 C_A^{n_2}$$

Descripción:

- C<sub>A</sub> = Concentración de lignina indicada por el número kappa de deslignificación.
- k<sub>1</sub> = Constante cinética 1
- k<sub>2</sub> = Constante cinética 2
- n<sub>1</sub> = Orden de reacción 1
- n<sub>2</sub> = Orden de reacción 2

Ecuación 16. Propagación de error de una suma o resta

$$R = X + Y - Z$$

$$\delta R = \sqrt{(\delta X)^2 + (\delta Y)^2 + (\delta Z)^2}$$

Descripción:

- R = Valor resultante
- X, Y, Z = Variables involucradas en la ecuación.
- $\delta X$ ,  $\delta Y$ ,  $\delta Z$  = Incertidumbre asociada a cada variable.

Ecuación 17. Propagación de error de una multiplicación o división

$$R = \frac{X * Y}{Z}$$

$$\delta R = |R| * \sqrt{\left(\frac{\delta X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{Z}\right)^2}$$

Descripción:

- R = Valor resultante
- X, Y, Z = Variables involucradas en la ecuación.
- $\delta X$ ,  $\delta Y$ ,  $\delta Z$  = Incertidumbre asociada a cada variable.

Ecuación 18. Media de resultados obtenidos durante análisis .

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N}$$

Descripción:

- $\bar{X}$  = Media aritmética de los datos obtenidos.
- $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  = Datos obtenidos involucrados en el cálculo de la media.
- N = Número total de observaciones.

Ecuación 19. Desviación estándar de los valores obtenidos durante análisis.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Descripción:

- X = variables sobre la que se calculará la desviación estándar.
- $X_i$  = Observación número i de la variable X, esta puede estar entre valores de 1 a N.
- N = Número total de observaciones.
- $\bar{X}$  = Media de la variable X.

Ecuación 20. Temperatura de película para pérdidas de energía por convección en balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011)

$$T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty)$$

Descripción:

- $T_s$  = Temperatura superficial de la olla (°C)
- $T_\infty$  = Temperatura del aire durante la cocción (°C)

Ecuación 21. Factor  $\beta$  para pérdidas de energía por convección en balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

Descripción:

- $T_f$  = Temperatura de película para pérdidas de energía por convección.

Ecuación 22. Número de Grashof para pérdidas de energía por convección en balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

Descripción:

- $g$  = aceleración gravitacional (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $\beta$  = Factor para pérdidas de energía por convección.
- $T_s$  = Temperatura superficial de la olla (°C)
- $T_\infty$  = Temperatura del aire durante la cocción (°C)
- $L$  = Altura de la olla de cocción (m)
- $\nu$  = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Ecuación 23. Determinación de aproximación para modelo de placas planas verticales en pérdidas por convección en balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011)

$$D \geq \left( \frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}} \right)$$

Descripción:

- $L$  = Altura de la olla de cocción (m)
- $Gr_L$  = Número de Grashof

Ecuación 24. Número de Rayleigh para pérdidas de energía por convección en balance de energía. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr$$

Descripción:

- $T_s$  = Temperatura superficial de la olla (°C)
- $T_\infty$  = Temperatura del aire durante la cocción (°C)
- $g$  = aceleración gravitacional (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $\beta$  = Factor para pérdidas de calor por convección natural
- $\nu$  = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)
- $Pr$  = Número de Prandtl
- $L_c$  = Altura de la olla (m)

Ecuación 25. Número de Nusselt para pérdidas de energía por convección en balance de energía. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

Descripción:

- $Ra_L$  = Número de Rayleigh
- $Pr$  = Número de Prandtl

Ecuación 26. Coeficiente de convección natural para balance de energía (Cengel & Ghajar, 2011)

$$h = \frac{Nu k}{L_c}$$

Descripción:

- $Nu$  = Número de Nusselt
- $k$  = Conductividad térmica (W/ m K)
- $L_c$  = Altura de la olla de cocción (m)

Ecuación 27. Pérdidas de energía por convección natural durante cocción alcalina con hidróxido de sodio. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Descripción:

- $T_s$  = Temperatura superficial de la olla (°C)
- $T_{\infty}$  = Temperatura del aire durante la cocción (°C)
- $A_s$  = Área superficial de transferencia de calor (m<sup>2</sup>)
- $h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección natural (W/ m °C)

Ecuación 28. Pérdidas de energía por radiación durante cocción alcalina con hidróxido de sodio. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Descripción:

- $T_s$  = Temperatura superficial de la olla (°C)
- $T_\infty$  = Temperatura del aire durante la cocción (°C)
- $\varepsilon$  = Emisividad térmica
- $\sigma$  = Constante de Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

Ecuación 29. Pérdidas de energía por evaporación de agua durante cocción alcalina con hidróxido de sodio.

$$\dot{Q}_{vap} = \dot{m} H_{fg}$$

Descripción:

- $\dot{m}$  = flujo másico de agua evaporada en el tiempo (kg/s)
- $H_{fg}$  = Entalpía de evaporación de agua (kJ/kg)

Ecuación 30. Energía consumida por reacción de deslignificación de raquis de banano previamente triturado.

$$\dot{Q}_{rxn} = \dot{Q}_{entra} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad}$$

Descripción:

- $\dot{Q}_{entra}$  = Energía entregada por estufa durante cocción. (W)
- $\dot{Q}_{rad}$  = Pérdida de energía por radiación (W)
- $\dot{Q}_{conv}$  = Pérdida de energía por convección natural (W)

## V. Antecedentes

En 2018 se llevó a cabo una investigación en Bangladesh (Arafat K. M., Nayeem, Quadery, Quaiyyum, & Sarwar, 2018), en la cual se caracterizó el extracto de fibra de banano (EBF) y residuos de fibra de banano (WBF) en términos de propiedades químicas y morfológicas para la producción de papel. Se determinó que la fibra WBF tiene baja  $\alpha$ -celulosa, lignina y tamaños de fibra largos. La pulpa de EBF y WBF se trató con diferentes cargas de alcalinas y diferentes tiempos de cocción. El rendimiento de la pulpa WBF fue de 35.9 % después de 120 minutos de cocción con 8 % de carga alcalina. Se concluyó que los residuos generados de la planta de banano pueden utilizarse para elaborar papel lo que puede mitigar el problema de contaminación y crear oportunidades laborales en el área rural.

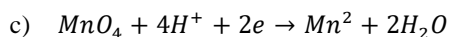
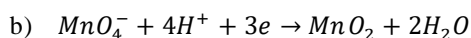
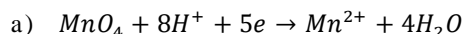
Por otro lado, en 2019 se llevó a cabo otra investigación en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Colombia (Ordoñez K. , 2019) en la cual se evaluó la viabilidad técnica del uso de los residuos agrícolas producidos en las cosechas de café (*Coffea arabica*) y plátano (*Musa paradisiaca*) para emplearse como materias primas en la producción de papel, por medio de la caracterización de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, y humedad con base húmeda. Se evaluó que los residuos de café contaban con 65.77% (m/m) de celulosa, 25.30% (m/m) de lignina y 14,08 % (m/m) de extraíbles, mientras que para los residuos de plátano se tuvo resultados de 74.75 % (m/m) de celulosa, 7.89% (m/m) de lignina, 23.64 % (m/m) de sustancias extraíbles y 15.85% (m/m) de humedad con base húmeda. Sus resultados permitieron determinar que tanto los residuos de plátano como los de café pueden ser utilizados como materias primas para la elaboración de papel por su contenido de celulosa , el porcentaje de humedad con base húmeda, lignina y extraíbles.

Mundialmente existen muchos métodos y estándares que permiten que la evaluación de la calidad de la pulpa celulósica después del proceso de deslignificación sea posible. Uno de los métodos más utilizados es la determinación del número kappa de la pulpa, este mide la cantidad de lignina residual en la pulpa. El método comúnmente utilizado es por medio de valoraciones con permanganato de potasio 0.1 N. Sin embargo, en 1999 se llevó a cabo la evaluación del número kappa utilizando espectrofotometría (Chai & Zhu, 1999), en esta investigación se desarrolló un método para la determinación rápida del grado de lignina bajo condiciones ácidas fuertes.

El número kappa se deriva del radio de absorción de la intensidad espectral a la longitud de onda específica de inicio y fin de la reacción de la pulpa con permanganato. Las condiciones ácidas fuertes se utilizan para prevenir la precipitación de  $MnO_2$  y la interferencia con la absorción del espectro de permanganato. Se determinó que la oxidación de la pulpa es completa en menos de 3 minutos. El número kappa medido en tres muestras de pulpa de dos especies de madera, con y sin blanqueamiento corresponden con la metodología estandarizada TAPPI, la cual emplea el método de titulación con tiosulfato. Se concluyó que el método con espectrofotometría es más simple, rápido y exacto.

Las desventajas del método por titulación es que es más largo por la preparación de un blanco experimental para reducir el error provocado por la alta volatilidad del yodo, la reacción se debe mantener bajo condiciones ácidas débiles, lo que causa variaciones en el número kappa reportado, los 10 minutos de reacción son arbitrarios y se requiere que el volumen consumido sea aproximadamente 50% del volumen inicial para obtener buenas mediciones, lo cual es imposible porque el exceso de permanganato de potasio consumido puede solo conocerse después que el número kappa se ha determinado. Además, puede que otros compuestos además de la lignina, como ácido hexenurónico se oxide con el permanganato durante los 10 minutos de reacción (Chai & Zhu, 1999).

Para el momento de la publicación de la investigación anterior, Li y Gellerstedt ya habían reportado resultados de un estudio cinético y el mecanismo de la reacción de la pulpa con permanganato de potasio sugerido en el método kappa estandarizado. Ellos midieron la concentración de permanganato directamente utilizando espectrofotometría UV/VIS. Ya que el número kappa se define como el volumen de permanganato de potasio 0.1 N consumido por un gramo de pulpa, se puede describir por las siguientes reacciones:



De acuerdo con Li y Gellerstedt, ambas reacciones toman lugar en la determinación del número Kappa, la reacción dominante será la de conversión a  $MnO_2$ . En el estudio realizado por Chai y Zhu a diferencia del estudio de Li y Gellerstedt se utilizó un medio ácido fuerte para evitar la precipitación de  $MnO_2$ . Como resultado, la interferencia en el espectro se eliminó y provoca que la reacción (a) sea la predominante. Por lo tanto, se determinó el número kappa de la pulpa directamente sin la necesidad de una calibración previa o correcciones. La determinación del número Kappa por espectrofotometría es posible de calcular de acuerdo a la ley de Beer, encontrando la absorbancia de la solución previo a la reacción de oxidación y después de haber completado la reacción.

Adicionalmente, dentro del enfoque de Guatemala, en 2016 la Universidad del Valle se llevó a cabo la investigación en modalidad de Megaproyecto presentado por Alejandra Velásquez, María Fernanda Mendizábal, María José Ramos y Sandy Guarcax; del diseño de una toalla sanitaria biodegradable a partir del tallo de la planta de banano, durante este estudio se analizaron las características físicas y químicas favorables del tallo, obteniendo resultados de celulosa y lignina con un promedio de  $71.4359 \pm 0.0492$  % m/m y  $5.6493 \pm 0.0330$  % m/m respectivamente. Durante este estudio la pasta celulósica obtenida resultó adecuada para la elaboración de un pliego de bobina 19x14 in con un costo unitario promedio de Q. 0.79. (Velásquez, Mendizábal, Ramos, & Guarcax, 2016)

## VI. Metodología

### A. Toma de muestras y pretratamiento

#### 1. Secado

##### Materiales y equipo

- Deshidratador industrial marca Corbett industries inc. (ver Cuadro 48 para datos de placa)
- Papel aluminio
- Termobalanza marca OHAUS (ver Cuadro 51 para datos de placa)

Procedimiento de secado de raquis de banano previamente triturado y sin triturar.

- a. Encender el deshidratador industrial y programarlo para una temperatura de 130 °C, esperar a que alcance 125 °C para comenzar a trabajar.
- b. Tomar muestra de 2 kg de raquis previamente triturado y prensado, y colocarlo uniformemente sobre bandejas perforadas del deshidratador industrial de gabinete.
- c. Cuando el deshidratador industrial se encuentre a la temperatura deseada, introducir las bandejas conteniendo el raquis húmedo y dejar secando por 10 horas aproximadamente. Voltar raquis manualmente cada 3 horas.
- d. Monitorear la humedad con base húmeda de la muestra cada 4 horas utilizando una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
- e. Al terminar el tiempo de secado extraer muestra del deshidratador industrial y proceder a determinar la humedad inicial por un balance de masa.

#### 2. Análisis de raquis entero

##### Materiales y equipo

- Cinta métrica
- Balanza industrial marca OHAUS (ver Cuadro 50 para datos de placa)

Procedimiento para el análisis de dimensiones de raquis de banano previo a trituración.

- a. Utilizando una cinta métrica, medir el largo, ancho y diámetro de cada uno de los raquis.
- b. Pesar cada raquis utilizando una balanza industrial.
- c. Calcular la densidad de cada raquis utilizando los valores de volumen y la masa.

### 3. Análisis de raquis previamente triturado y prensado

#### Materiales y equipo

- Vernier marca Stanley (ver Cuadro 59 para datos de placa)

Procedimiento para determinación de volumen de trozos de raquis de banano previamente triturado y prensado.

- a. Tomar 30 muestras aleatorias de las partículas de raquis previamente triturado, prensado y almacenado en bolsas herméticas.
- b. Utilizando un Vernier medir el largo, ancho y diámetro de las partículas presentes en las muestras de raquis previamente triturado y prensado.
- c. Con las dimensiones previamente tomadas calcular el volumen de cada partícula de raquis triturado y prensado.

### 4. Densidad de raquis previamente triturado y prensado

#### Materiales y equipo

- Probeta plástica de 1000 mL
- Balanza industrial marca OHAUS (ver Cuadro 50 para datos de placa)

Procedimiento para determinación de densidad de trozos de raquis previamente triturados y prensados.

- a. Llenar con agua una probeta de 1000 mL hasta 500 mL.
- b. Pesar 40 g de raquis previamente triturado y prensado.
- c. Añadir raquis dentro de la probeta con agua, sumergir hasta que la pulpa se humedezca dentro de la probeta.
- d. Verificar el cambio de volumen de líquido en la probeta para determinar la densidad de la pulpa.

### B. Propiedades de raquis de banano

#### 1. Humedad con base húmeda por secado

#### Materiales y equipo

- Deshidratador industrial marca OHAUS (ver Cuadro 48 para datos de placa).
- Papel aluminio
- Balanza industrial marca OHAUS (ver Cuadro 50 para datos de placa)

Procedimiento para determinación de humedad:

- a. Previo a secar en el deshidratador industrial, pesar la cantidad de muestra que ingresará al equipo utilizando una balanza industrial.
- b. Secar durante 10 horas en deshidratador industrial a 130 °C (Ver procedimiento en sección de toma de muestras y pretratamiento).
- c. Después de secado colocar muestras en bolsas plásticas herméticas y transparentes previamente taradas y proceder a pesar en balanza industrial.
- d. Determinar la cantidad de agua eliminada por diferencia de masa.

## 2. Humedad con base húmeda por termobalanza

Materiales y equipo

- Termobalanza marca OHAUS (ver Cuadro 51 para datos de placa)
- Balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)

Procedimiento para determinación de humedad con termobalanza:

- a. Encender termobalanza.
- b. Programar la termobalanza para la medición de pulpa estándar criterio A60 (1 mg/60 s).
- c. Tomar una muestra de 0.5 g de raquis previamente secado.
- d. Colocar en la muestra en la cabina de la termobalanza previamente programada con la tara en 0 y cerrar.
- e. Encender termobalanza y esperar aproximadamente 10 minutos para obtener el resultado de porcentaje de humedad en la muestra inicial.

## 3. Extraíbles en raquis de banano por extracción Soxhlet Etanol-Tolueno

Materiales y equipo

- 3 Beaker de 150 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 3 sistemas de extracción Soxhlet (condensador, portador de muestra, balón de una boca, ver figura 9)
- 4 mangueras de hule diámetro 1.5 cm para ajuste de ingreso de agua a condensadores.
- 3 mantas de calentamiento marca electrothermal (ver Cuadro 60 para datos de placa)
- Perlas de ebullición
- Papel filtro
- Balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)
- 20 g de raquis previamente triturado y seco.
- Embudo büchner

- Kitasato de 200 mL
- Varilla de agitación
- Etanola 99.9 % de pureza (ver Cuadro 54 para datos de reactivo).
- Tolueno al 99.9 % de pureza (ver Cuadro 55 para datos de reactivo).
- Agua destilada

Procedimiento para determinación de extraíbles por extracción Soxhlet

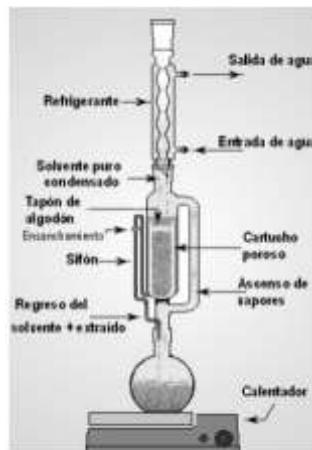
a. Preparación etanol-tolueno (1:2 por volumen)

- 1) Medir 133.3 mL de tolueno al 99 % grado industrial utilizando una probeta graduada de 100 mL y agregar en un balón de destilación de 500 mL.
- 2) Medir 66.67 mL de etanol 90 % grado industrial utilizando una probeta graduada de 100 mL y añadir al tolueno en balón de destilación.

b. Extracción

- 1) Después de preparar la solución de etanol-tolueno, preparar equipo de extracción Soxhlet y agregar perlas de ebullición.

Figura 11: Diagrama de sistema Soxhlet



(Nuñez, 2018)

- 2) Pesar 6 g de muestra de raquis previamente triturado y seco en una balanza analítica y colocar en matraz de extracción Soxhlet.
- 3) Preparar una cápsula de papel filtro cortando un rectángulo de 10 cm por 20 cm y doblar para formar un sobre, ajustar con grapas dejando suficiente espacio para ingresar la muestra.
- 4) Introducir la muestra de raquis en la cápsula de papel filtro y cerrar utilizando gramas. Colocar la cápsula de muestra dentro del matraz de extracción para permitir que los lavados ocurran a apropiadamente.
- 5) Utilizando el soporte metálico y las pinzas, proceder a armar el sistema Soxhlet. Conectar el matraz que contiene la muestra al condensador y a balón con solvente. Conectar dos mangueras al condensador para el flujo adecuado del agua y permitir que el agua comience a circular dentro del condensador.

- 6) Ajustar estufa para permitir que se llegue a la temperatura de 115°C la cual corresponde a la temperatura de ebullición del solvente .
- 7) Ebullición con reflujo por aproximadamente 4 a 5 horas hasta que la solución en el interior del extractor se torne incolora.
- 8) Realizar una segunda extracción solamente con etanol durante 2 a 4 horas hasta obtener una solución incolora nuevamente para eliminar el tolueno remanente.
- 9) Lavar el residuo con 500 mL de agua destilada y filtrar al vacío utilizando un Kitasato de 500 mL, un embudo Büchner y papel filtro previamente tarado. Trasladar la muestra a un trozo de papel de aluminio previamente tarado.
- 10) Determinar la humedad con base húmeda inicial de la muestra utilizando 0.500 g de la muestra y una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
- 11) Secar el resto de la muestra en un horno mufla a 130 °C por 40 minutos.
- 12) Pesar la pulpa libre de extraíbles utilizando una balanza analítica.
- 13) Determinar la humedad con base húmeda remanente en la muestra utilizando 0.500 g de la muestra y una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
- 14) Almacenar la muestra seca y libre de extraíbles en bolsas herméticas tipo Ziploc.

#### 4. Cuantificación de $\alpha$ -celulosa en raquis por extracción con NaOH.

##### Materiales y equipo

- 3 Beaker de 250 mL
- 1 balón aforado de 100 mL
- 2 balón aforado de 50 mL
- Pipeta graduada de 10 mL con bulbo
- 1 kitasato de 250 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 1 embudo Büchner
- 1 varilla de agitación
- Papel filtro
- 1 balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)
- Hidróxido de sodio al 99 % (ver Cuadro 56 para datos de reactivo)
- Ácido acético glacial al 99 % (ver Cuadro 58 para datos de reactivo)

Procedimiento para desintegración con hidróxido de sodio para determinación de  $\alpha$ -celulosa.

- a. Pesar una muestra de 1 g de raquis previamente triturado, seco y libre de extraíbles, utilizando una balanza analítica.
  - b. Agregar 10 mL de una solución de hidróxido de sodio al 17.5% (p/v), agitar y dejar reposar por 2 minutos.
  - c. Agregar otros 5 mL de la solución de hidróxido de sodio, agitar y dejar reposar por 5 minutos.
  - d. Repetir el paso anterior y dejar reposando por 5 minutos.
  - e. Agregar otros 5 mL de solución, agitar y dejar reposar por 30 minutos en baño de maría a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - f. Agregar 30 mL de agua destilada, agitar y dejar reposar por 1 h a temperatura ambiente.
  - g. Filtrar al vacío utilizando un Kitasato de 500 mL, un embudo Büchner y papel filtro previamente tarado. Lavar el residuo con una solución preparada de 33 mL de agua destilada y 25 mL de la solución de NaOH al 17.5 % m/m.
  - h. Realizar un segundo lavado con 30 mL de agua destilada y realizar una segunda filtración.
  - i. Agregar 15 mL de una solución de ácido acético al 10 % m/m y dejar reposar por aproximadamente 3 minutos.
  - j. Lavar con 50 mL de agua destilada y filtrar al vacío utilizando un Kitasato de 500 mL y un embudo Büchner.
  - k. Determinar la humedad con base húmeda en la muestra utilizando una termobalanza tomando 0.500 g de muestra y utilizando un método estandarizado para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
  - l. Trasladar la muestra a un papel de aluminio previamente tarado y secar en un horno a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante aproximadamente 2 horas.
  - m. Pesar la muestra final libre de lignina utilizando una balanza analítica.
  - n. Determinar la humedad con base húmeda en la muestra seca utilizando una termobalanza tomando 0.500g de muestra y utilizando un método estandarizado para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
5. Lignina insoluble en ácido en raquis por método Tappi T 222.

Materiales y equipo

- 1 balón aforado de 1000 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 1 pipeta graduada de 10 mL con bulbo
- 3 beaker de 150 mL
- 1 pipeta graduada de 20 mL
- 3 erlenmeyer de 2000 mL
- 1 embudo Büchner
- 1 kitasato de 250 mL
- Papel filtro
- Papel aluminio
- Horno marca OVIEDO (ver Cuadro 52 para datos de placa).

- Balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)
- Termobalanza marca OHAUS (ver Cuadro 51 para datos de placa)
- Ácido sulfúrico al 99 % (ver Cuadro 61 para datos de reactivo).
- Agua destilada

Procedimiento para determinación de cantidad de lignina en raquis de banano

- Preparar una solución de ácido sulfúrico al 72 % m/m
- Secar completamente la cristalería a utilizar y tarar en balanza analítica.
- Preparar 10 g de fibra seca y libre de extraíbles.
- Colocar la muestra en un beaker de 200 mL previamente tarado.
- Añadir 40 mL de solución fría (10 a 15 °C) de ácido sulfúrico a cada muestra. Añadir el ácido en pequeños incrementos mientras se agita el material con un agitador magnético. Mantener el beaker en un baño a  $2 \pm 1$  °C durante la dispersión del material.
- Después que el material se ha dispersado, cubrir el beaker con un vidrio de reloj y mantener a  $20 \pm 1$  °C por 2 horas. Agitar el material frecuentemente durante este tiempo para completar la solución.
- Añadir aproximadamente 500 mL de agua en un Erlenmeyer de 2000 mL y transferir el material del beaker al Erlenmeyer. Transferir la pulpa utilizando 200 mL de agua destilada. Completar la dilución con 800 mL de agua destilada.
- Ebullir la solución por 4 horas, manteniendo el volumen constante. Evitar que el volumen baje de 1500 mL.
- Mantener el material insoluble (lignina) asentado, manteniendo el Erlenmeyer en una posición inclinada. Si la lignina se encuentra finamente dispersa, se requiere tener un mayor tiempo para que esta se asiente. Dejar reposando por 24 h.
- Sin agitar el precipitado, decantar o utilizar una pipeta graduada para eliminar la solución sobrenadante.
- Filtrar al vacío utilizando un Kitasato de 500 mL, un embudo büchner y papel filtro previamente tarado. Lavar la lignina utilizando 50 mL agua destilada a 50 °C. Trasladar la muestra a un papel de aluminio previamente tarado.
- Secar el residuo utilizando un horno mufla a  $105 \pm 3$  °C hasta obtener peso constante.
- Determinar la humedad con base húmeda en la muestra utilizando una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).

### C. Metodología de deslignificación

#### Materiales y equipo

- 1 beaker de 100 mL
- 1 varilla de agitación
- Balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)
- Balanza industrial marca OHAUS (ver Cuadro 50 para datos de placa)
- Probeta de 1000 mL
- 3 bolsas plásticas
- Estufa marca OVIEDO (ver Cuadro 52 para datos de placa)
- Hidróxido de Sodio al 99 % (ver Cuadro 56 para datos de reactivo)
- Olla de acero vitrificado capacidad de 32 L
- 3 cubetas plásticas de 10 L.

#### Procedimiento para deslignificación de raquis de banano en medio alcalino

1. Preparación de solución de hidróxido de sodio
  - a. Pesarse en un beaker de 100 mL previamente tarado la cantidad de hidróxido de sodio necesaria dependiendo de la concentración deseada para llevar a cabo la deslignificación utilizando una balanza analítica.
  - b. Agregar 2 L de agua al recipiente donde se llevará a cabo la deslignificación
  - c. Precalentar a 50 °C, agregar cuidadosamente la solución de NaOH hasta disolver completamente.
  - d. Agregar la cantidad de agua restante de modo que se complete un volumen con una relación 8:1 de licor respecto al volumen de raquis introducido al reactor.
2. Deslignificación
  - a. En una olla de acero vitrificado de 34 L de capacidad, añadir 6 L de agua y precalentar hasta llegar a 100 °C utilizando una estufa casera.
  - b. Pesarse 300 g de raquis previamente triturado, prensado y secado utilizando una balanza industrial.
  - c. Colocar la muestra en una bolsa plástica transparente y añadir solución de hidróxido de sodio.
  - d. Cuando el agua dentro de la olla de acero alcance los 90 °C, introducir la bolsa plástica que contiene la muestra de raquis y la solución de NaOH.
  - e. Esperar a que el sistema se estabilice y la solución de NaOH con el raquis alcance una temperatura de 90 °C.
  - f. Cuando el reactor alcance la temperatura, medir el tiempo de deslignificación (60 minutos, 100 minutos o 120 minutos), utilizando un cronómetro digital.

### 3. Recepción de pulpa deslignificada

- a. Al terminar el tiempo de deslignificación, extraer la bolsa plástica que contiene la pulpa de la olla de acero.
- b. Utilizando un tamizador de metal, filtrar la suspensión de pulpa obtenida y presionar la pulpa para decantar el licor excedente en la muestra y medir el volumen de licor obtenido
- c. Lavar la pulpa libre de licor utilizando 5 L de agua, utilizando un tamizador de metal filtrar la pulpa y presionar para decantar el agua excedente en la pulpa.
- d. Pesar la cantidad de pulpa húmeda retirada del reactor utilizando una balanza industrial.
- e. Almacenar la pulpa libre de licor, en bolsas plásticas herméticas, lista para su blanqueamiento.

### D. Evaluación de pulpa resultante

#### 1. Consistencia de la pulpa por método Tappi T240

##### Materiales y equipo

- 1 cubeta de 10 L
- 1 beaker de 100 mL
- 1 beaker de 1000 mL
- 1 Embudo Büchner
- 1 Kitasato de 250 mL
- Papel filtro
- Balanza industrial marca OHAUS (Cuadro 50 para datos de placa)
- Balanza analítica marca OHAUS (Cuadro 49 para datos de placa)

##### Procedimiento para determinación de consistencia de pulpa celulósica:

- a. Depositar la pulpa de la bolsa plástica hermética en una cubeta de 40 L previamente tarada en una balanza industrial y diluir con 5 L de agua. Pesar el contenido de la cubeta para determinar el peso neto.
- b. Agitar con una paleta de madera. Manteniendo la agitación, tomar 5 porciones de 100 mL de pulpa diluida utilizando un beaker de 100 mL. Depositar las porciones en un beaker de 1000 mL previamente tarado.
- c. Pesar el contenido neto de pulpa diluida en el beaker de 1000 mL.
- d. Colocar un papel filtro previamente tarado en un filtro Büchner, rociar con agua destilada y aplicar succión con vacío en un matraz Kitasato.
- e. Con ayuda de un tamiz de metal, filtrar la pulpa diluida. En caso de que el licor filtrado se visualice turbio, realizar varias filtraciones hasta obtener un licor libre de pulpa.
- f. Al terminar la filtración, cerrar la válvula de vacío y proceder a remover el papel filtro utilizando una espátula analítica. Trasladar la pulpa retenida en el tamiz de metal al papel filtro.
- g. Pesar el papel filtro con pulpa húmeda utilizando una balanza analítica.
- h. Secar la muestra en un deshidratador industrial a 90°C hasta obtener un peso constante.

- i. Determinar la humedad con base húmeda de la pulpa resultante utilizando una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).

## 2. Número kappa por espectrofotometría

### Materiales y equipo

- 2 balones aforados de 1000 mL
- Balanza analítica marca OHAUS (ver Cuadro 49 para datos de placa)
- 1 Embudo Büchner
- 1 kitasato de 250 mL
- 1 varilla de agitación
- 1 beaker de 150 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 1 pipeta de plástico de 5 mL
- 3 beaker de 500 mL
- 1 beaker de 50 mL
- 1 agitador magnético
- 1 estufa para agitación
- 1 probeta de 50 mL
- 1 celda de cuarzo para lectura en espectrofotómetro
- Espectrofotómetro UV/VIS marca Perkin Elmer (ver Cuadro 53 para datos de placa).
- Ácido sulfúrico al 99 % (ver Cuadro 61 para datos de reactivo)
- Permanganato de potasio al 99 % (ver Cuadro 57 para datos de reactivo)

### Procedimiento para determinación de número kappa por espectrofotometría

a. Preparar 1 L de una solución estandarizada de permanganato de potasio 0.1 N.

- 1) Disolver 3.16g de permanganato de potasio en un beaker de 100 mL utilizando 50 mL de agua destilada. Calentar a 90 °C con agitación constante hasta disolver completamente.
- 2) Esperar a que la solución llegue a 25 °C y trasvasar la solución a un balón aforado de 1 L. Aforar con agua destilada y agitar para homogenizar la solución.
- 3) Trasvasar la solución a un recipiente de vidrio color ámbar y cubrir con papel de aluminio.
- 4) Dejar reposar la solución por 2 días.
- 5) Después del tiempo de reposo, filtrar la solución al vacío utilizando un kitasato, papel filtro y embudo Büchner.

- b. Preparar una solución de ácido sulfúrico con una concentración de 2.0 M.
- 1) Enfriar 100 mL de agua destilada hasta 15 °C en un beaker de 500 mL utilizando un baño de hielo.
  - 2) Mientras el agua está fría, añadir 25 mL de ácido sulfúrico al 99.9 % y esperar que la solución alcance temperatura ambiente. Llevar la solución a 15 °C de nuevo utilizando un baño de hielo.
  - 3) Añadir 28.6 mL de ácido sulfúrico al 99.9 % a la solución y esperar a que la solución alcance temperatura ambiente.
  - 4) Cuando se encuentre estable, añadir 100 mL de agua destilada a un balón aforado de 500 mL, trasvasar la solución de ácido sulfúrico a balón aforado. Colocar balón aforado en baño de hielo y esperar a que este alcance la temperatura ambiente.
  - 5) Terminar de aforar balón con agua destilada y agitar para obtener una mezcla homogénea. Esperar a alcanzar una temperatura de 25 °C.
  - 6) Trasladar la mezcla a un recipiente de vidrio para su almacenamiento.
- c. Colocar en un beaker aproximadamente 0.1 g de pulpa previamente deslignificada y seca en un beaker de 100 mL, agregar 5 mL de la solución estandarizada de permanganato de potasio 0.1 N y 20 mL de la solución estándar de ácido sulfúrico a 2 M.
- d. Agitar la mezcla constantemente utilizando un agitador magnético.
- e. Mientras la muestra continua en agitación tomar una muestra de 2 mL aproximadamente.
- f. Trasladar la muestra filtrada a celda de espectrofotómetro UV/VIS, colocar celda dentro del equipo y proceder a realizar la lectura. Realizar lecturas en el tiempo 0 minutos y 10 minutos para la reacción.
- g. Al terminar la lectura, regresar muestra de solución a beaker en agitación para continuar con las pruebas.
- h. Calcular el número kappa de la pulpa.

## 2. Rendimiento de pulpa celulósica con base seca

### Materiales y equipo

- Probeta plástica de 1000 mL
- Balanza industrial marca OHAUS (ver Cuadro 50 para datos de placa).
- Horno marca OVIEDO (ver Cuadro 52 para datos de placa)
- Termobalanza marca OHAUS (ver Cuadro 51 para datos de placa)

### Procedimiento para determinación de rendimiento de pulpa

- a. Al finalizar el proceso de deslignificación utilizar un colador para eliminar el exceso de licor en la pulpa celulósica.
- b. Agregar 3 L de agua de grifo utilizando una probeta de 1000 mL a la pulpa celulósica para lavar y eliminar toda traza de licor negro. Repetir hasta observar que se ha eliminado el licor completamente.

- c. Eliminar el exceso de agua en la pulpa celulósica utilizando un colador.
- d. Ingresar la muestra a horno por 150 minutos a 105 °C, utilizando papel aluminio como soporte.
- e. Al terminar el tiempo de secado, sacar la pulpa seca de horno.
- f. Determinar la humedad con base húmeda de la pulpa resultante utilizando una termobalanza estandarizada para pulpa criterio A60 (1 mg/60 s).
- g. Sustraer la humedad de la muestra de pulpa final y calcular el rendimiento de pulpa celulósica con base seca.

### 3. Ajuste de modelo matemático para cinética por Google Colab

#### Materiales y equipo

- Herramienta online Google Colab

Procedimiento para el procesamiento de datos de deslignificación de raquis de banano.

- a. Ingresar a la plataforma de Google Colab a través del navegador de internet y una cuenta personal de Google drive.
- b. Exportar las librerías de numpy as np, pandas as pd, plotly.express as px y plotly.graph as go.
- c. Importar los datos de número kappa obtenidos durante la deslignificación a diferentes tiempos y carga de hidróxido de sodio.
- d. Definir el modelo utilizando el siguiente código:
 

```
Def model1 (ca, k1,k2,n1,n1):
model = (-k1*np.power(ca,n1)) + (k2*(np.power(ca,n2)))
return model
```
- e. Utilizando las librerías importadas anteriormente, completar el código para generar combinaciones aleatorias entre todos los parámetros cinéticos. (ver cálculo 13 para mayor detalle).
- f. Definir el porcentaje de error para los datos obtenidos con los valores de los parámetros.
- g. Proceder a correr el código de programación.
- h. Realizar varias pruebas del código hasta obtener una combinación de parámetros con error promedio menor a 5 %.

#### 4. Ajuste de modelo matemático para cinética por Berkeley Madonna

Materiales y equipo

- Software Berkeley Madonna ®

Procedimiento para el procesamiento de datos de deslignificación de raquis de banano.

- Definir el modelo cinético para proceso de deslignificación propuesto para la descripción de la concentración de lignina final en la pulpa. Este modelo se propuso de las diferentes reacciones que se involucran en el proceso.
- Definir las condiciones iniciales para el modelo dependiendo del número kappa previo a la deslignificación de la pulpa y el método de aproximación Runge-Kutta 4. Programar un tiempo inicial de 0, un tiempo final de 160 minutos, con un incremento diferencial de 0.01.
- Escribir el código del modelo cinético en lenguaje de programación para el software Berkeley Madonna:

INIT CA = 43

$$d/dt(CA) = (-K1*CA^{N1}) + (K2*CA^{N2})$$

$$K1 = 1$$

$$K2 = 1$$

$$N1 = 1$$

$$N2 = 2$$

- Importar los datos de número kappa obtenidos experimentalmente, desde la pestaña de parámetros/curve fit/ import dataset.
- Ajustar los parámetros (K1, N1, K2, N2) utilizando la función Curve fit dentro del software. Estos parámetros se ajustaron con los valores aproximados obtenidos con el programa online de Google Colab.
- Correr la simulación en el software para obtener los parámetros cinéticos directamente del programa al iterar múltiples veces hasta obtener el mejor ajuste.

## 5. Hidróxido de sodio residual en licor negro

### Materiales y equipo

- 1 Balón aforado de 50 mL
- 1 Bureta graduada de 50 mL
- 1 pipeta graduada de 5 mL
- 3 erlenmeyer de 50 mL
- 1 beaker de 250 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 1 beaker de 150 mL
- Agitador magnético
- Ácido clorhídrico al 37 % (Ver Cuadro 62 para datos de reactivo)
- Indicador fenolftaleína
- Soporte de metal
- Pinza metálica para bureta

Procedimiento para determinación de hidróxido de sodio en licor por valoraciones con solución de ácido clorhídrico 0.125 N.

- a. Preparar una solución de ácido clorhídrico en balón aforado de 50 mL, añadiendo 0.5 mL de ácido clorhídrico con pipeta graduada de 5 mL.
- b. Aforar el balón con agua destilada y agitar para obtener una solución homogénea.
- c. Agregar los 50 mL de solución a bureta graduada.
- d. Diluir muestras de licor de deslignificación en erlenmeyer de 250 mL, añadiendo 10 mL de licor y 100 mL de agua destilada.
- e. Agregar 3 gotas de indicador fenolftaleína.
- f. Utilizando la bureta, agregar gota a gota solución de ácido clorhídrico hasta observar cambio de color. Anotar el consumo de solución.
- g. Determinar la cantidad de hidróxido de sodio en la muestra por estequiometría.

## VII. Datos finales

Cuadro 1. Propiedades de raquis previamente triturado utilizado como materia prima para el proceso de deslignificación.

Muestra	Lignina (% m/m)	$\alpha$ -Celulosa (% m/m)	Extraíbles (% m/m)	Humedad (% m/m)
1	15.06 $\pm$ 5.017	64.74 $\pm$ 3.947	13.79 $\pm$ 4.160	89.30 $\pm$ 0.9402
2	13.66 $\pm$ 0.741	73.81 $\pm$ 1.754	8.629 $\pm$ 3.670	87.39 $\pm$ 4.640
3	12.93 $\pm$ 3.801	75.14 $\pm$ 4.570	12.956 $\pm$ 1.625	82.93 $\pm$ 3.170
Media y desviación estándar	13.89 $\pm$ 0.03304	71.23 $\pm$ 0.05825	11.79 $\pm$ 0.03479	86.54 $\pm$ 0.03828
Madera de coníferas	18 – 30	40 - 50	4 -20	91 - 179

Cada uno de los resultados es un promedio de un triplicado de análisis para cada uno de los lotes diferentes de raquis. El porcentaje de lignina determinó con la metodología estandarizada TAPPI-222. El porcentaje de  $\alpha$ -celulosa se determinó con una cocción alcalina (ver metodología apartado B.4.) El porcentaje de extraíbles se determinó con una extracción Soxhlet etanol-tolueno (ver metodología apartado B.3.) Los porcentajes de lignina,  $\alpha$ -celulosa y extraíbles fueron están expresados en base seca, la humedad de la muestra está expresada en base húmeda. Los datos comparativos de madera de coníferas son teóricos (ver antecedentes)

Cuadro 2. Características finales de raquis de banano triturado y deslignificado por cocción alcalina

Razón de NaOH g/ 100 g pulpa	Tiempo de Cocción	Rendimiento (% m/m)	Número Kappa	Consistencia (% m/m)
8	100	55.9 ± 0.0102	34.01 ± 0.03012	28.03 ± 1.60
	130	49.0 ± 0.0114	35.98 ± 0.1746	22.33 ± 1.97
	150	41.5 ± 0.0130	42.41 ± 0.1232	25.05 ± 1.78
10	100	43.4 ± 0.0143	35.52 ± 0.5053	34.22 ± 4.24
	130	37.4 ± 0.0084	29.32 ± 0.9426	36.38 ± 3.35
	150	37.3 ± 0.00143	38.98 ± 0.7531	25.72 ± 2.16
12	130	31.7 ± 0.0127	39.37 ± 0.1945	22.59 ± 1.85
14	130	29.8 ± 0.0135	42.0 ± 0.2561	23.97 ± 2.95

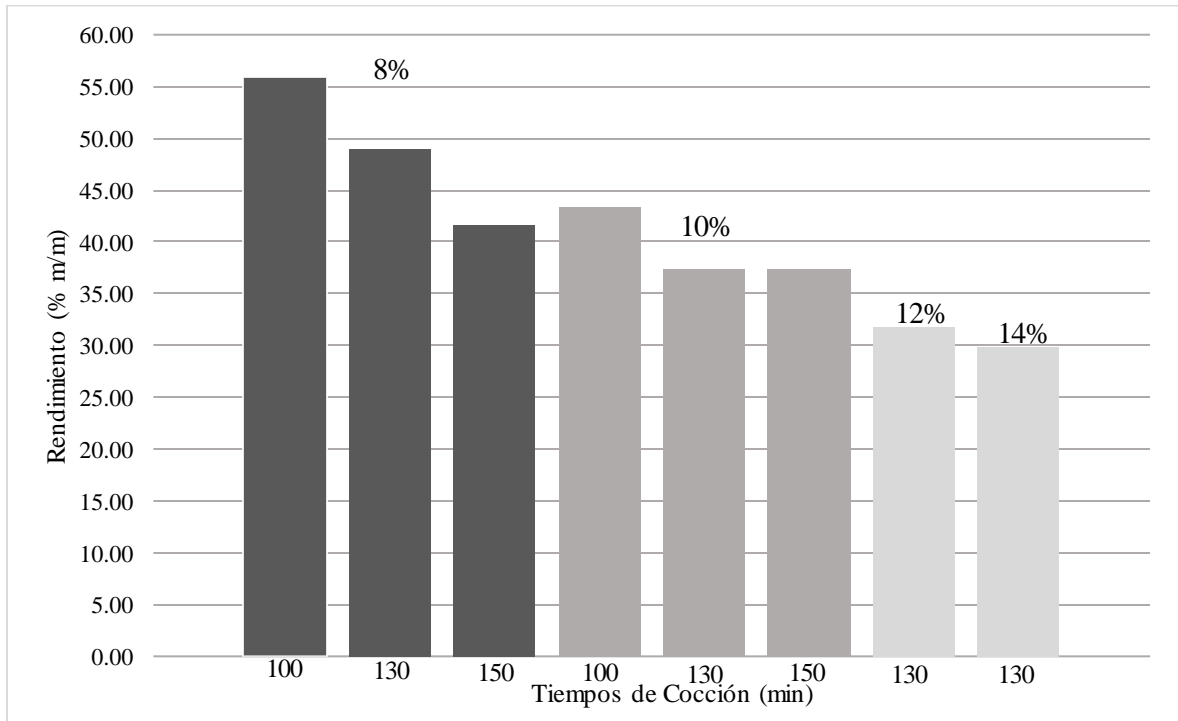
La razón de NaOH representa la cantidad de reactivo añadido a la pulpa durante la cocción, disuelto en el agua agregada. (ver apartado C en metodología). El rendimiento se determinó con base seca de pulpa. El número kappa corresponde a la cantidad de lignina contenida en la muestra de pulpa seca recuperada después de la cocción (ver metodología sección D.2.). La consistencia de las muestras de pulpa húmeda, obtenidas después de la cocción, se determinó usando el método Tappi-240 (ver metodología sección D.1.). Cada uno de los resultados corresponde a lecturas individuales de una muestra tomada de un lote de raquis, previamente triturado y deslignificado.

Cuadro 3. Cumplimiento de características finales de raquis de banano triturado y deslignificado por cocción alcalina.

Especificaciones de cumplimiento				
Carga de NaOH (%)	Tiempo de Cocción	Rendimiento (40-50 %)	Número kappa (20 -40)	Consistencia
8	100	No cumple	Cumple	Alta
	130	Cumple	Cumple	Alta
	150	Cumple	No Cumple	Alta
10	100	Cumple	Cumple	Alta
	130	No cumple	Cumple	Alta
	150	No cumple	Cumple	Alta
12	130	No cumple	Cumple	Alta
14	130	No cumple	No Cumple	Alta

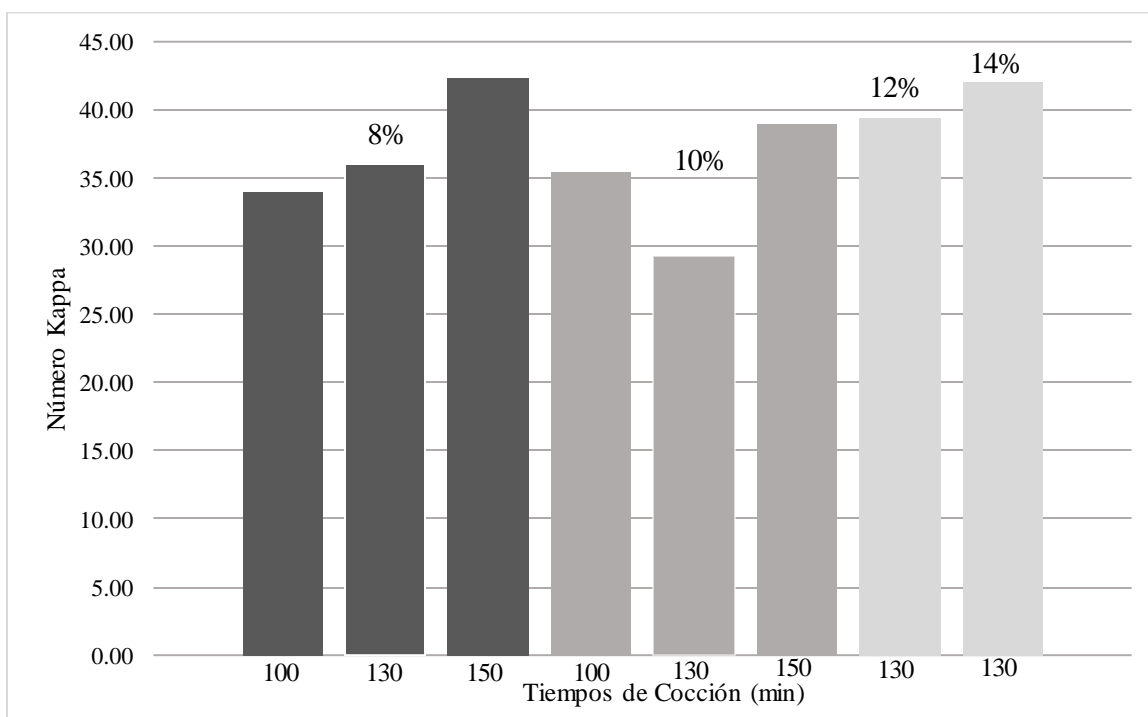
La razón de NaOH representa la cantidad de reactivo añadido a la pulpa durante la cocción, disuelto en el agua agregada. (ver apartado C en metodología). El rendimiento se determinó con base seca de pulpa. El número kappa corresponde a la cantidad de lignina contenida en la muestra de pulpa seca recuperada después de la cocción (ver metodología sección D.2.). Los resultados en el rendimiento se consideran en rangos entre 20 – 40 % como consistencia alta, entre 8 – 12 % como consistencia media y entre 1 – 4 % como consistencia baja según el método estandarizado TAPPI T240 (ver marco teórico para definición de consistencia según el método).

Figura 12. Rendimiento de pulpa seca de raquis de banana después de proceso de deslignificación por cocción alcalina.



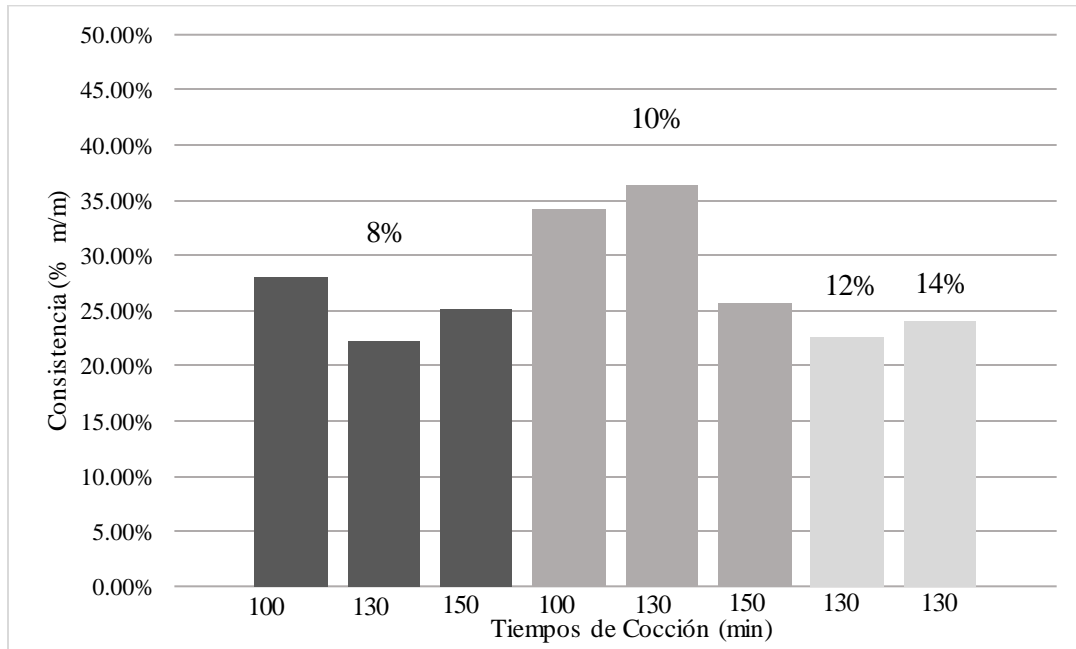
En la Figura 10 se muestran los rendimientos para los diferentes tiempos de cocción a 8, 10, 12 y 14 % de carga de NaOH, esto representa los gramos de reactivo agregados por cada 100 gramos de pulpa. El rendimiento de pulpa está expresado con base seca de raquis previamente deslignificado (ver metodología sección D). Los resultados en el rendimiento se consideran en rangos entre 40 – 50 % m/m para madera de coníferas (Briggs, 1994).

Figura 13. Número Kappa de pulpa después de proceso de deslignificación por cocción alcalina



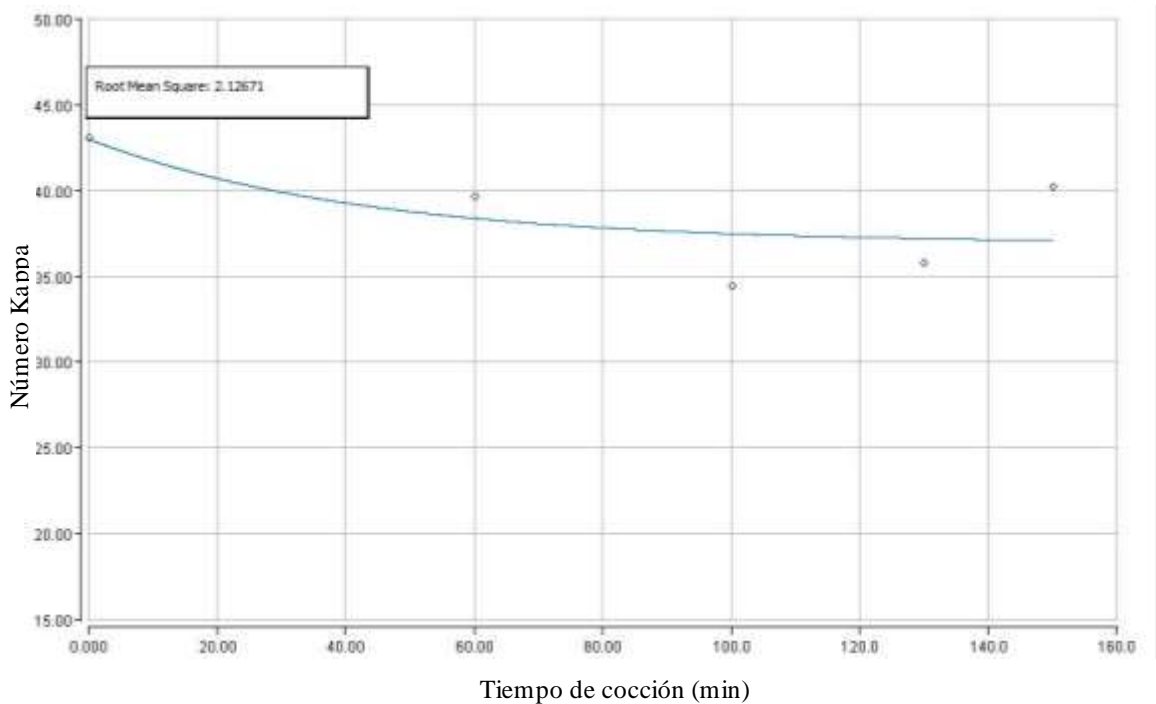
En la Figura 11 se muestra los números kappa para los diferentes tiempos de cocción a 8, 10, 12 y 14 % de carga de NaOH, esto representa los gramos de reactivo agregados por cada 100 gramos de pulpa. El número kappa representa la cantidad de lignina residual en la pulpa después del proceso de deslignificación (ver metodología sección D.2.). Los resultados en el rendimiento se consideran en rangos entre 20 - 40 para considerarse pulpa blanda para blanqueamiento (Briggs, 1994).

Figura 14. Consistencia de pulpa de raquis de banano después de proceso de deslignificación por cocción alcalina



En la Figura 12 se muestra los valores de consistencia para los diferentes tiempos de cocción a 8, 10, 12 y 14 % de carga de NaOH, esto representa la concentración de pulpa disuelta en agua al final del proceso de deslignificación (ver metodología sección D.1.). Los resultados en el rendimiento se consideran en rangos entre 20 – 40 % como consistencia alta, entre 8 – 12 % como consistencia media y entre 1 – 4 % como consistencia baja según el método estandarizado TAPPI T240 (ver marco teórico para definición de consistencia según el método).

Figura 15. Ajuste del modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 8% con software Berkeley Madonna.



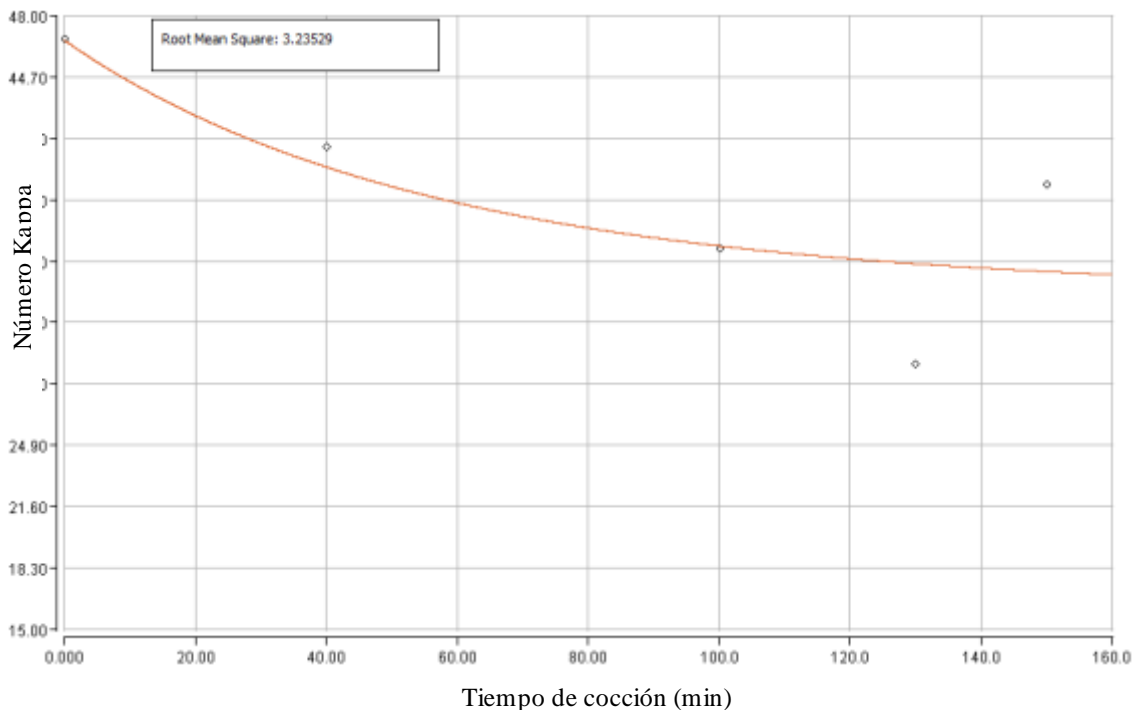
En la Figura 13 se muestran los números kappa obtenidos a 60, 100, 130 y 150 minutos de deslignificación, así como el ajuste del modelo matemático de  $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$  utilizando el software Berkeley Madonna, de donde se obtuvieron los valores para las constantes. La ecuación describe el comportamiento de la reacción de deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio. Se obtuvo un error del 2.12671 para el ajuste del modelo.

Código de colores:

Puntos: Número Kappa durante experimento realizado a pequeña escala para la deslignificación de raquis de banano con 8 g de Hidróxido de sodio por 100 g de pulpa.

Curva celeste: Grado de deslignificación predicho por modelo matemático para los valores experimentales representados por puntos.

Figura 16. Ajuste del modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 10% con software Berkeley Madonna.



En la Figura 14 se muestran los números kappa obtenidos a 40, 100, 130 y 150 minutos de deslignificación, así como el ajuste del modelo matemático de  $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$  utilizando el software Berkeley Madonna, de donde se obtuvieron los valores para las constantes. La ecuación describe el comportamiento de la reacción de deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio. Se obtuvo un error de 3.235 para el ajuste del modelo.

Código de colores:

Puntos: Número Kappa durante experimento realizado a pequeña escala para la deslignificación de raquis de banano con 10 g de Hidróxido de sodio por 100 g de pulpa.

Curva roja: Grado de deslignificación predicho por modelo matemático para los valores experimentales representados por puntos.

Cuadro 4. Modelo matemático propuesto para describir la reacción de deslignificación y reacción de oxidación con permanganato de potasio a diferentes condiciones.

Escala aplicable	Modelo matemático
Laboratorio	$\mu = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$

El sistema a escala laboratorio se especificó para masas de pulpa entre 100 y 300 g (Ver metodología sección C).

Cuadro 5. Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo matemático que describe el grado de deslignificación y reacción de oxidación a las diferentes condiciones estudiadas del 8 % de carga de hidróxido de sodio

Parámetro	Simbología	Valor ajustado al modelo a escala laboratorio
Constante asociada a la degradación de lignina inicial	K1	$4.7 \frac{1}{min}$
Exponente al que está elevado el término que indica la degradación de lignina inicial	N1	0.39995
Constante asociada a la degradación de lignina durante el cambio de selectividad	K2	$5.52084 \frac{1}{min}$
Exponente al que está elevado el término que indica la degradación de lignina durante el cambio de selectividad	N2	0.35535

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros cinéticos para la deslignificación de raquis de banano al 8% de carga de NaOH, esto representa la concentración de pulpa disuelta en agua al final del proceso de deslignificación y tiempos de 60, 90, 100 y 150 minutos.

Cuadro 6. Parámetros cinéticos obtenidos para el modelo matemático que describe el grado de deslignificación y reacción de oxidación a las diferentes condiciones estudiadas del 10 % de carga de hidróxido de sodio

Parámetro	Simbología	Valor ajustado al modelo a escala laboratorio
Constante asociada a la degradación de lignina inicial	K1	5.0029 $\frac{1}{min}$
Exponente al que está elevado el término que indica la degradación de lignina inicial	N1	0.90522
Constante asociada a la degradación de lignina durante el cambio de selectividad	K2	5.08056 $\frac{1}{min}$
Exponente al que está elevado el término que indica la degradación de lignina durante el cambio de selectividad	N2	0.90082

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros cinéticos para la deslignificación de raquis de banano al 10% de carga de NaOH, esto representa la concentración de pulpa disuelta en agua al final del proceso de deslignificación y tiempos de 60, 90, 100 y 150 minutos.

## VIII. Discusión de resultados

El proceso de deslignificación presentado en esta investigación se evaluó desde dos perspectivas diferentes. La primera se realizó a partir de las propiedades lignocelulósicas del residuo previo a la cocción alcalina y la segunda desde las propiedades de la pulpa obtenida con bajas concentraciones de lignina (menor a 30 % m/m). Tomando la primera perspectiva, se evaluaron las características iniciales del raquis de banano para determinar si este cuenta con concentraciones de lignina bajas para efectuar una extracción con hidróxido de sodio y de esta forma obtener una pulpa un porcentaje alto de celulosa (mayor a 50 % m/m), lo que le aporta suavidad y propiedades aptas para su uso en otros procesos industriales. Además, durante la evaluación del proceso se determinaron los rangos de tiempo y concentración adecuados para efectuar esta cocción.

Se determinó que el proceso de deslignificación fue posible debido a que durante la cocción alcalina se rompen los enlaces  $\beta$ -O-4 éter arílicos contenidos en la lignina, estos son fáciles de romper en comparación con los enlaces carbono-carbono contenidos en la celulosa, por lo tanto, dependiendo de la concentración y tiempo de cocción existirá selectividad por estos enlaces, los cuales se romperán por hidrólisis. Por otro lado, uno de los efectos más importantes de la cocción alcalina es el rompimiento de los enlaces éster entre la lignina y el xilano, lo que aumenta la remoción de enlaces cruzados, aumentando la superficie interna de la celulosa. El porcentaje de hidrólisis aumentará dependiendo de la concentración de hidróxido de sodio y el tiempo de reacción.

Por lo tanto, el tratamiento final involucra el rompimiento de enlaces de hidrógeno de la celulosa cristalina, ruptura de la matriz hemicelulosa-lignina, aumento de la porosidad y área superficial de celulosa, lo cual se demuestra en la disminución de la cantidad de lignina final (Sarria, Gallo, & Benítez, 2018). Por otro lado, se ha demostrado que el tratamiento alcalino es efectivo para residuos agrícolas, con un mayor porcentaje de deslignificación comparado con ácido o agentes oxidantes, ya que es más efectivo para romper los enlaces éster entre la lignina, hemicelulosa y celulosa, sin llegar a la fragmentación de los polímeros de hemicelulosa. (Mohammad & Keikhosro, 2008).

Iniciando con el análisis del raquis de banano, se evaluaron las características del residuo previo a su deslignificación. La característica principal fue la humedad con base húmeda, ya que actualmente el raquis es utilizado como abono para el cultivo de banano por su alta concentración de agua (mayor a 50 % m/m), la cual puede aprovecharse después de un proceso de prensado. La cantidad de humedad con base húmeda promedio determinada en el raquis fue de  $86.54 \pm 0.038\%$  m/m, lo que se encuentra en un rango menor al de las maderas coníferas. Esta humedad perjudica el proceso de deslignificación, ya que afecta directamente el rendimiento de la pulpa obtenida y la capacidad de cocción. Tomando en cuenta este hallazgo, si se desea escalar el proceso, se recomienda evaluar la deslignificación de pulpa húmeda y la viabilidad de reducción de costos de secado al comparar con los costos de bajo rendimiento obtenido.

Durante la investigación también se comparó el tamaño de los trozos de raquis de banano después de triturar, pero antes y después de prensar. Se determinó que no existe una diferencia significativa entre ambas muestras, ya que el volumen de las partículas no difiere significativamente, siendo el volumen de raquis prensado de  $0.14 \text{ cm}^3$  y el volumen de raquis sin prensar de  $0.16 \text{ cm}^3$ . Por lo tanto, ya que prensar la fibra triturada previo a la deslignificación no afecta a la calidad de las partículas, la investigación estuvo basada en la deslignificación de raquis previamente triturado y prensado por la bananera, para garantizar el ahorro de energía y tiempo de secado previo a la deslignificación (ver Cuadros 25 y 26 de datos intermedios). Por otro lado, se observó que la desviación estándar para los resultados es alta (mayor o igual a la media), lo que significa que la dispersión en la media es alta y que por lo tanto no existe una uniformidad en las partículas después de la trituración, esto afectará la unión de las fibras en la pulpa celulósica resultante, lo que en consecuencia afectará el producto final, en caso ésta se utilice para la obtención de algún producto en la línea de la industria papelera. El tamaño y uniformidad de la pulpa también repercutirá en la facilidad de transferencia de masa y transferencia de calor durante la cocción.

Continuando con el análisis de raquis previo a la deslignificación, se evaluó la cantidad de extraíbles en el residuo (carbohidratos de bajo peso molecular, sales, polifenoles y otros compuestos solubles en agua). Mientras mayor sea la cantidad de extraíbles, menor será el rendimiento durante la cocción, ya que estos también se eliminarán al disolverse en agua o al reaccionar con hidróxido de sodio u otros compuestos formados durante la deslignificación. También son importantes para determinar la proporción de extraíbles en la pulpa, ya que algunos de estos productos pueden ser resinas y ácidos grasos que durante la cocción pasarán un proceso de saponificación que puede dañar el equipo de deslignificación. También se podrían tener resinas ácidas, aldehídos y alcoholes que provoquen que el caldo al final de la cocción sea tóxico y se aumenten los costos en el tratamiento para descartarlo de forma correcta.

Por otro lado, la calidad de la pulpa resultante puede verse afectada si se tienen compuestos hidrofóbicos que absorban el agua evitando que la pulpa pueda desintegrarse de forma correcta y consecuentemente afectando a la suavidad. Se determinó que la cantidad de extraíbles en el raquis de banano es de  $10.90 \pm 0.035\%$  m/m, encontrándose dentro del rango aceptado para pulpa de maderas coníferas (4 – 20 % m/m), lo que

garantiza que su efecto en la deslignificación de la pulpa no afectará gravemente a la calidad o creará depósitos incorregibles en los equipos utilizados.

A partir de la fibra libre de extraíbles se logró cuantificar la cantidad de celulosa presente en el raquis de banano siendo esta de  $71.23 \pm 0.058$  % m/m. Este resultado es mayor que el porcentaje normal reportado para maderas coníferas (ver Cuadro 2 en resultados). Entre mayor sea el porcentaje de celulosa presente en el residuo mejor será la calidad y el rendimiento obtenido al final de la cocción. Este porcentaje de celulosa asegura el potencial del raquis de banano como adecuado para la obtención de pulpa. Se determinó la cantidad de  $\alpha$ -celulosa ya que esta representa la mayor proporción dentro de la holocelulosa en comparación de la hemicelulosa.

Debido a la importancia de la extracción de  $\alpha$ -celulosa y su evaluación para el proceso de deslignificación, se obtuvo el espectro IR del residuo después de la desintegración alcalina (ver Cuadros 30, 31 y 32 en datos intermedios) y se comparó con el espectro teórico de la celulosa. Se puede observar para las tres muestras de celulosa obtenidas por desintegración alcalina del residuo vegetal, un pico característico entre los 890 y 1030  $\text{cm}^{-1}$  perteneciente a un  $\text{CH}_2$  simétrico y un estiramiento C-O-C asimétrico. Además, se observa un pico a los 1314.27, 1366.31 y 1367.15  $\text{cm}^{-1}$  los que corresponden a la vibración CH y la vibración  $\text{CH}_2$  en celulosa. Por último se observa la banda ancha del O-H a los 3333.62, 3332.19 y 3332.08  $\text{cm}^{-1}$ . La coincidencia de los picos característicos de la celulosa teórica con el residuo de extracción verifica que la cuantificación de celulosa es correcta. Por otro lado, también se comparó con los espectros de absorción de fructosa, sacarosa y glucosa para verificar que la cuantificación no se trataba de ninguno de estos compuestos presentes en las fibras vegetales. Esto se observa en que para estos tres compuestos específicos la banda ancha de O-H y la vibración C-H son mucho más pronunciadas.

Además de la celulosa, se evaluó la cantidad de Lignina en el raquis previo a la cocción alcalina. La cantidad de Lignina en la fibra es determinante para decidir si el proceso de elaboración de pulpa celulósica es viable para este residuo. Entre menor sea la cantidad de Lignina inicial en el raquis, el proceso de cocción requerirá menor tiempo y menor cantidad de Hidróxido de Sodio. Por lo tanto, las condiciones de cocción establecidas en esta investigación pertenecen exclusivamente a la especie de banano cultivada en Guatemala. Si se decide evaluar el proceso para otro tipo de residuo, se deberá tomar en cuenta la cantidad de lignina presente en el mismo.

La concentración evaluada pertenece a la Lignina Klason, es decir a la Lignina insoluble en ácido. La madera contiene entre 18 y 30 % de lignina, mientras que para el raquis de Banano se determinó una cantidad del  $13.89 \pm 0.033$  % m/m, esto permite la evaluación de la obtención de pulpa celulósica por deslignificación como un proceso viable que permitirá la obtención de una pulpa suave y blanda. La concentración baja de Lignina permite predecir que los recursos energéticos y de reactivos para el proceso de cocción alcalina. El porcentaje de lignina también estará altamente asociado con el rendimiento de la pulpa obtenida. Después de evaluar la cantidad de celulosa, extraíbles y lignina en el raquis de banano se puede aceptar el proceso de deslignificación como una oportunidad de aprovechamiento de este residuo agrícola.

Observando los resultados del Cuadro 2 en resultados, se pudo determinar que los rangos de deslignificación que contribuyen a la obtención de una pulpa celulósica con las mejores propiedades finales son de 8% a 10% de carga de hidróxido de sodio y un tiempo de cocción de 100 a 130 minutos. Se evaluaron estas condiciones ya que dependiendo de la carga de hidróxido de sodio y tiempo de cocción existirá una mayor desintegración de la pulpa, valores de consistencia mayores a 10 % m/m consistencia y un rendimientos mayores a 30 % m/m. Además, esto repercutirá directamente en la energía consumida, costos de producción y cantidad de reactivos consumidos durante el proceso.

Se observó que debajo de 8% y 100 minutos no existe una desintegración correcta de la pulpa, por lo que esta conserva su dureza y altas concentraciones de lignina y por arriba de 10% y 130 minutos, aunque se obtenga una pulpa más suave, esta tiene una mayor desintegración y el rendimiento será menor. Además, mientras mayor sea la concentración alcalina utilizada, mayor será la protección, mantenimiento y costo de materiales utilizados dentro del proceso de pulpeo. También se tomó en cuenta que la pulpa celulósica puede utilizarse en un proceso de la industria papelera, en donde se requerirá un blanqueamiento y ocurrirá una mayor deslignificación, por consiguiente, si la desintegración de la pulpa es alta, esto afectará en el rendimiento al finalizar el blanqueo.

Dentro del proceso de evaluación del raquis inicial y en el proceso de deslignificación se considera como una posible variación de los resultados la temporada en la que cada muestra de raquis fue recolectada, se tomaron 3 muestras diferentes de raquis de banano, en enero, que es la época de invierno en el país, en marzo que es la época de verano y en septiembre que es la época de invierno lluvioso. Se recomienda ampliar el estudio al evaluar la variación de las características del residuo en diferentes épocas del año y la influencia del clima en el cultivo.

Para iniciar con la evaluación de la pulpa resultante del proceso de cocción, se evaluó el rendimiento en base seca de pulpa (ver Cuadro 2 y Figura 10 en resultados). Se observó que mientras aumenta el tiempo de cocción y la concentración de hidróxido de sodio se reduce el rendimiento de la pulpa obtenida. Esto es debido a que entre mayor tiempo de reacción, mayor cantidad de compuestos están siendo disueltos en el caldo de cocción y mayor será la desintegración de la fibra. Principalmente, durante la cocción se verá desintegrada la hemicelulosa, cenizas y resinas presentes en el raquis de banano. Por lo tanto, las concentraciones mayores al 10% y tiempos mayores a 130 minutos no promueven un buen rendimiento de pulpa y representan un mayor costo de producción. Aunque los tiempos menores de 100 minutos y concentraciones menores al 8% promuevan un rendimiento mayor, estos no garantizarán la concentración de pulpa y la suavidad de esta al final de la cocción ya que no ha comenzado la desintegración.

Adicionalmente, se evaluó el pH del caldo y de la pulpa resultante después del proceso de deslignificación y se obtuvo valores entre 12 y 13.5. Estos valores se obtuvieron previo al lavado de la pulpa y remoción del exceso de líquidos. El pH obtenido es resultado de las condiciones alcalinas para llevar a cabo la deslignificación. Durante la deslignificación es necesario llevar a cabo el control del pH de la cocción, el cuál influye en el rompimiento de los enlaces entre lignina y celulosa. Entre las ventajas del método alcalino, es

que la lignina presente en el caldo de cocción puede ser recuperada por acción enzimática o por neutralización con dióxido de carbono. Sin embargo, en el caso de la adición de enzimas es necesaria una acidificación con ácido clorhídrico hasta un pH de 4.8 (Lauwaert, y otros, 2019)

Por otro lado, si no se aprovecha el licor negro obtenido durante la deslignificación este tiene un impacto ambiental significativo en las aguas efluentes, por lo que estudios han revelado que este licor, además de ser utilizado para la recolección de lignina, también puede ser utilizado nuevamente en la deslignificación por las características regenerativas de la hidrólisis. Esto reduce el consumo de agua durante la cocción, la cantidad de hidróxido de sodio y los desperdicios en el proceso. (Muryanto, y otros, 2015)

También se evaluó la cantidad de entrada y salida de hidróxido de sodio mediante valoraciones con una solución ácida, se observó que la cantidad de hidróxido consumido fue de 3.424 g, lo que representa el 22.83% del Hidróxido de sodio ingresado al proceso, al tener un consumo bajo de hidróxido de sodio se puede demostrar que la mayoría de las reacciones durante la deslignificación corresponden a hidrólisis para el rompimiento de enlaces, siendo estas de aspecto regenerativo.

En conjunto con el análisis del rendimiento de la pulpa, se evaluó la consistencia de la pulpa final. Esta consistencia ha sido definida por los métodos estandarizados Tappi como la concentración de pulpa en una mezcla de pulpa y agua. Se observó que la consistencia de la pulpa va a depender de la concentración de hidróxido de sodio utilizado (ver Figura 12 en resultados) de forma que para la carga de hidróxido de sodio de 10% se tendrá la mayor consistencia. Esto puede explicarse al conocer que la pulpa a concentraciones menores de 10 % y tiempos de deslignificación menores a 100 minutos tendrá un proceso de deslignificación menor por lo que al momento de medir la consistencia las fibras estarán más unidas entre sí y no habrá una uniformidad de dilución en las muestras. Mientras que para una carga mayor al 12% se tendrá una mayor desintegración de la pulpa, la cual al diluirse en agua tendrá una mayor dispersión y por lo tanto presentará una menor consistencia. También se observó que los tiempos de cocción mayores a 130 minutos disminuyen la consistencia debido a una mayor desintegración de la fibra.

La consistencia de la pulpa es una característica importante de evaluar ya que será determinante en un proceso industrial. Dependiendo de la consistencia de la pulpa se tendrá diferentes variaciones en las bombas destinadas a su transporte, tiempos de secados, tanques de almacenamiento, porcentaje de agua consumida y proporción de entrada de pulpa a moldes. Se ha determinado que la pulpa entre 20-40% tiene una consistencia alta, entre 8-12% una consistencia media y entre 1-4% una consistencia baja. Para el raquis de banano se obtuvieron consistencias entre la categoría alta. La consistencia de pulpa también afecta el proceso de deslignificación, ya que entre mayor sea la consistencia de la pulpa, mayor será la concentración de hidróxido de sodio necesaria para la cocción o para el proceso de blanqueamiento.

Por último, para determinar las propiedades de la pulpa después de la deslignificación se evaluó el número kappa, el cual indica la cantidad de lignina final después del proceso de cocción (ver Figura 11 en resultados). Para calcularlo, se siguió la metodología propuesta por Chai X. y Zhu J. (ver antecedentes) la cual consiste

en la reacción de lignina con permanganato de potasio y el cambio de absorbancia que esta produce. Con el número kappa fue posible concluir por medio de la cocción alcalina se logró reducir la proporción de lignina, esto puede observarse en que la pulpa sin deslignificar tiene un número kappa de 46.77 y al final de la deslignificación se obtuvo valores menores para cada una de las pruebas (ver Cuadro 40 de datos intermedios).

Al analizar el resultado del número kappa del raquis de banano (ver Figura 11 en resultados) se observó que este dependerá tanto de la concentración de hidróxido de sodio, como del tiempo de deslignificación. Entre mayor sea el tiempo de cocción de la pulpa, mayor tenderá a ser en número kappa, así como entre mayor sea la cantidad de hidróxido de sodio utilizada para la reacción, el resultado en la pulpa será una mayor cantidad de Lignina. Esto no se debe a que la cantidad de lignina y los parámetros sean inversamente proporcionales, sino porque existe un punto mínimo de concentración de lignina extraída y un tiempo y concentración máximas a la que la hemicelulosa de la pulpa se comenzará a desintegrar juntamente con la lignina y provocando que la lignina ya extraída se mezcle de nuevo con la pulpa.

Además, se observó que el número kappa influye directamente en el rendimiento de la pulpa. El grado de deslignificación y el rendimiento son variables inversamente relacionadas, cuando aumenta el grado de deslignificación y se produce pulpa con menor número kappa, se disminuyen los rendimientos, esto se debe a que hay una mayor desintegración y mayor proporción de compuestos se perderán en el caldo de cocción.

Por lo tanto, para la evaluación de la deslignificación respecto a la concentración de lignina se elaboró un modelo matemático como propuesta para el ajuste con los datos teóricos. Estos tiempos y concentraciones se ven respaldados en la cinética de la reacción y la tendencia de los datos de concentración de lignina al final del proceso de deslignificación.

Debido a que la cantidad de reactivo y tiempo necesario para realizar las mediciones del método Kappa, no se logró realizar un triplicado de las mediciones, lo que perjudica estadísticamente el resultado. Por lo tanto, se recomienda ampliar el estudio llevando a cabo un triplicado o cuadruplicado de las lecturas para el número Kappa, lo que permite mejorar la replicabilidad del método y las conclusiones de los resultados. Por otro lado, también fue posible tener desviaciones en las lecturas de absorción por la concentración de permanganato de potasio en el medio, siendo este de un color morado oscuro en las muestras que presentaron bajos niveles de oxidación por la baja concentración de permanganato de potasio. La lectura por espectrofotometría también pudo ser afectada por la precipitación de  $MnO_2$  durante la reacción de oxidación, siendo una interferencia para el resultado del número Kappa, sin embargo, según el método teórico establecido por Li y Gellerstedt, este compuesto no provoca una desviación significativa de los resultados respecto al método estandarizado por titulación Tappi T236.

Se propuso un modelo de la velocidad de la reacción de la deslignificación dependiendo de la concentración de lignina durante diferentes tiempos de cocción. La propuesta se hizo tomando en cuenta la reacción de oxidación que se lleva a cabo durante la determinación del número kappa (ver Cuadro 3 para

referencia del modelo matemático propuesto). La ecuación cinética se evaluó dependiendo de las reacciones de la lignina con el hidróxido de sodio durante la cocción, el primer término de la reacción corresponde a una reacción inicial con la Lignina, sin embargo, se conoce que a tiempos de cocción mayores de 100 minutos y concentraciones de hidróxido mayores a 10 g de reactivo por 100 g de pulpa, cambiará la selectividad de la reacción de hidrólisis, por lo que comenzará a reaccionar la hemicelulosa.

Se conoce las reacciones químicas que ocurren en la remoción de lignina, es la fragmentación de la lignina, solubilización de lignina y transporte de fragmentos de lignina solubilizados, al hidrolizarse la celulosa y hemicelulosa, se da paso a la reacción de lignina ubicada en las partes más internas de la fibra, lo que provoca un cambio en la medición del número kappa de deslignificación. Por lo tanto, el segundo término de la reacción representa el aumento de la lignina disponible. Es importante resaltar que el modelo matemático es una propuesta para la explicación de la deslignificación de raquis de banano. Se recomienda llevar a cabo otros estudios para determinar la cinética de la reacción de deslignificación en función del tiempo de cocción. En los datos obtenidos de la deslignificación con carga de hidróxido al 8 g /100 g de pulpa se observa que de 0 a 60 minutos se tendrá la fase inicial de deslignificación, de 100 a 130 minutos la fase bulk y de 130 en adelante se tendrá la fase final, lo que explica la reacción de hemicelulosa en la cocción.

En el proceso de cocción alcalina, una característica importante es que las macromoléculas de lignina se romperán en moléculas más pequeñas. Debido a que se disuelven en la solución, estas moléculas de lignina ya no pueden condensarse en macromoléculas de nuevo. Por lo tanto, la explicación de este fenómeno puede deberse a una reacción de hidrólisis alcalina de la celulosa, ya que bajo las condiciones de concentraciones de hidróxido de sodio altas, las macromoléculas de celulosa se romperán en dos o más moléculas. Esto provoca una mayor degradación de la pulpa y una desviación en la lectura de la concentración de lignina, ya que la glucosa producto de la hidrólisis se oxidará bajo las condiciones con permanganato de potasio. Por lo tanto, durante la determinación del número kappa, se estará dando una combinación de una oxidación rápida de las estructuras aromáticas de la lignina y una oxidación lenta de los azúcares reductores, aunque la oxidación de una variedad de otras estructuras también puede estar involucrada.

Adicionalmente, se observa que según el modelo matemático definido, al tener la velocidad de reacción como el diferencial de concentración de lignina en el tiempo, se puede concluir que el mínimo al que tiende la función será la mínima cantidad de lignina presente durante el tiempo de cocción. Durante la cocción a una carga de 8 g NaOH/100 g de pulpa se obtuvo un mínimo a los 100 minutos de cocción y durante la cocción a 10 g NaOH/100 g de pulpa se obtuvo un mínimo a los 130 minutos. Por lo tanto, en el rango de estas concentraciones se puede concluir que el mayor grado de deslignificación se encuentra entre este intervalo de tiempo.

Por otro lado, para mejorar el modelo cinético se recomienda estudiar la integración de la concentración de hidróxido de sodio utilizado en la deslignificación como otro parámetro en el modelo. De modo que se pueda obtener una ecuación aplicable en cualquier proceso de cocción manteniendo las condiciones del estudio.

Evaluar la cinética de la reacción a través del modelo matemático fue de importancia para poder concluir que dentro de la reacción se tendrá una disminución de la concentración de lignina en la pulpa hasta un punto en donde se comience a hidrolizar la celulosa obteniendo una consistencia y rendimiento de pulpa menor, lo que perjudica el proceso y aumenta los costos de producción de la pulpa celulósica.

Por último, se analizó el cumplimiento de cada uno de los parámetros de la pulpa celulósica obtenida al hacer una comparación con los requerimientos para la pulpa celulósica proveniente de coníferas según los estándares Tappi (ver Cuadro 3 de resultados). Los estándares de cumplimiento seguidos durante este trabajo tienen validez ya que cada uno de estos está adaptado tanto para pulpa proveniente de recursos maderables y para pulpa proveniente de otros productos vegetales. Cada uno de los estándares cuenta con rangos de resultados, porcentajes de repetibilidad y reproducibilidad para ambos tipos de pulpa celulósica.

Los resultados fueron comparados con los estándares de calidad para pulpa proveniente de coníferas ya que la pulpa celulósica proveniente de la planta de banano puede ser una solución recomendable como alternativa de obtención de pulpa en contraste con la proveniente de la deforestación de bosques. La pulpa de productos maderables es de interés por su bajo contenido de lignina, lo que permite tener valores guía de la calidad deseada para la evaluación y aplicación en los procesos de dureza, blanqueamiento, color y contenido de celulosa en otros recursos vegetales.

Por último, al comparar los estándares de calidad se observó que estos cumplen con las características de calidad final de la pulpa, tanto de color, dureza, número kappa y consistencia. Sin embargo, el rendimiento siempre será afectado por la cantidad de hidróxido de sodio presente en la cocción y su efecto en la desintegración final de las fibras. De esta forma, se logró determinar que el rango de deslignificación se debe mantener entre una carga de 8-10 % de hidróxido de sodio y tiempos de deslignificación entre 100 y 130 minutos a temperatura constante, para garantizar que el rendimiento, consistencia y número kappa se mantendrán en niveles adecuados según las condiciones en este trabajo.

## IX. Conclusiones

1. La cantidad de lignina inicial en el raquis de banano previo al proceso de deslignificación es de  $13.89 \pm 0.03304$  % (m/m) el cual es menor que el rango para madera de coníferas (18 – 30 % m/m), por lo concluir que para las condiciones del estudio, el raquis de banano es apropiado para la producción de pulpa celulósica.
2. La cantidad de  $\alpha$ -celulosa inicial en el raquis de banano previo al proceso de deslignificación es de  $71.23 \pm 0.05825$  % (m/m) el cual es mayor que el rango para madera de coníferas (40 – 50 % m/m), por lo concluir que para las condiciones del estudio, el raquis de banano es apropiado para la producción de pulpa celulósica.
3. La cantidad de extraíbles inicial en la muestra de raquis de banano previo a la deslignificación es de  $10.90 \pm 0.03479$  % (m/m) el cual se encuentra en el rango para madera de coníferas (4 - 20 % m/m), por lo concluir que para las condiciones del estudio, el raquis de banano es apropiado para la producción de pulpa celulósica.
4. La humedad en base húmeda en la muestra de raquis de banano previo al proceso de secado y la deslignificación es de  $86.54 \pm 0.03828$  % (m/m) el cual es menor que el rango para madera de coníferas (91 – 179 % m/m), por lo concluir que para las condiciones del estudio, el raquis de banano es apropiado para la producción de pulpa celulósica.
5. El rendimiento con base seca de la pulpa de raquis de banano deslignificada a diferentes concentraciones y tiempos de cocción se encuentra en un rango entre  $29.8 \pm 0.0135$  y  $55.9 \pm 0.0102$  % m/m para las condiciones de este estudio, siendo la cocción a 100 minutos la que presenta los valores más altos de rendimiento. Entre mayor sea la concentración de hidróxido de sodio y tiempo de cocción, menor será el rendimiento de pulpa obtenida.

6. La consistencia de la pulpa deslignificada se encuentra en un rango entre  $22.33 \pm 1.97$  y  $36.38 \pm 3.35$  % (m/m). Los mejores resultados de consistencia se obtuvieron al 10% de concentración, lo que indica que a valores bajos de concentración se tendrá mayor unión entre las fibras y entre mayor concentración se tendrá una mayor dispersión, por lo tanto, una disminución en la consistencia. La consistencia de pulpa también afecta el proceso de deslignificación, ya que entre mayor sea la consistencia de la pulpa, mayor será la concentración de hidróxido de sodio necesaria para la cocción o para el proceso de blanqueamiento.
7. El número kappa de deslignificación se encuentra en un rango de  $29.32 \pm 0.9426$  y  $42.41 \pm 0.1232$ , garantizando la disminución de la cantidad de lignina original en la muestra de raquis de banano hasta un 37.31 %. El número kappa de deslignificación será menor para tiempos entre 100 y 130 minutos de cocción, ya que dependerá de la desintegración de pulpa total.
8. Se concluyó que el rango de condiciones que producen la pulpa adecuada para la fabricación de papel y cartón es entre 8% a 10% de carga alcalina y un tiempo de cocción de 100 a 130 minutos, al evaluar los mejores resultados, al obtener resultados de consistencia entre 20-40 %, rendimientos entre 40-50 % y número kappa entre 20-40, lo que pertenece a madera blanda para blanqueamiento según estándares Tappi.
9. Se propuso un modelo cinético que describe el proceso de deslignificación y oxidación de lignina durante la determinación del número kappa para el sistema de producción de pulpa celulósica a escala laboratorio, tomando en cuenta la hidrólisis de celulosa y la concentración de lignina en la pulpa:  $r = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$ . Los parámetros cinéticos se ajustaron a concentraciones de 8 y 10 g de hidróxido de sodio por 100 g de pulpa, con lo que se logró que el modelo logre predecir la reducción de lignina durante la cocción alcalina.
10. Se recomienda estudiar la integración de la concentración de hidróxido de sodio utilizado en la deslignificación como otro parámetro para mejorar el modelo cinético. De modo que se pueda obtener una ecuación aplicable en cualquier proceso de cocción manteniendo las condiciones del estudio.

11. Evaluar la cinética de la reacción a través del modelo matemático fue de importancia para poder evaluar el proceso de deslignificación y concluir que dentro de la reacción se tendrá una disminución de la concentración de lignina en la pulpa hasta un punto en donde se comience a hidrolizar la celulosa obteniendo una consistencia y rendimiento de pulpa menor, lo que perjudica el proceso y aumenta los costos de producción de la pulpa celulósica. De esta forma, se logró determinar que el rango de deslignificación se debe mantener entre una carga de 8-10 % de hidróxido de sodio y tiempos de deslignificación entre 100 y 130 minutos a temperatura constante, para garantizar que el rendimiento, consistencia y número kappa se mantendrán en niveles adecuados según las condiciones en este trabajo.

## X. Recomendaciones

1. Evaluar la deslignificación de pulpa húmeda y su efecto en el rendimiento final del proceso, por el ingreso de pulpa con exceso de humedad al proceso de cocción para determinar el efecto del secado previo a la deslignificación, el aumento o disminución de los costos de producción y las características de la pulpa celulósica obtenida.
2. Realizar extracciones Soxhlet con otros solventes como etanol: benceno (1:2) y acetona: agua (9:1), ya que dependiendo del solvente utilizado se pueden cuantificar otro tipo de extraíbles como lo son resinas y compuestos aromáticos que no son solubles en etanol: tolueno (1:2) de esta forma se puede tener una mejor caracterización del residuo.
3. Identificar los compuestos involucrados en los extraíbles de raquis de banano al caracterizar por cromatografía de gases, HPLC, CNMR o FTIR para evaluar su efecto en el proceso de deslignificación y llegar a un conocimiento más profundo de las reacciones involucradas. De esta forma se puede determinar si existen otros compuestos que intervienen en el proceso de deslignificación y ampliar el conocimiento de la reacción.
4. Por el alto contenido de  $\alpha$ -celulosa (mayor al 60 % m/m) en el raquis de banano se recomienda evaluar la viabilidad de fermentación de este residuo para la obtención de bioetanol después del pretratamiento por cocción alcalina, siendo la celulosa la principal fuente de glucosa como sustrato, ya que la deslignificación permite el acceso directo a la reacción con la celulosa y hemicelulosa en la fibra.
5. Evaluar el efecto de la temperatura dentro del proceso de deslignificación, dejando fija la variable de concentración durante la cocción alcalina, conociendo que el nivel de concentración adecuado para estas condiciones es entre 8 y 10 g de hidróxido de sodio por 100 gramos de pulpa, ya que a nivel industrial el control de temperatura requerirá una mayor inversión y complejidad de diseño.
6. Para avanzar en la mejora de la calidad se recomienda realizar mediciones y ensayos que garanticen la repetibilidad de los resultados para realizar un seguimiento y validez de un proceso de certificación de la pulpa celulósica proveniente de raquis de banano.

7. Por los beneficios medioambientales de la producción de pulpa celulósica de raquis de banano se recomienda evaluar las estrategias de marketing que puedan ser implementadas para la distribución de papelo cartón tomando en cuenta los costos y la calidad necesaria para el producto.

## XI. Bibliografía

- Arafat, K., Nayeem, J., Quaiyyum, M., & Sarwar Jahan, M. (2018). Handmade paper from waste banana fibre. *Bangladesh journal of scientific and industrial research*, 53(2), 83-88. doi:<http://dx.doi.org/10.3329/bjsir.v53i2.36668>
- Argyropoulos, D., Akim, L., & Ahazi, B. (2002). Salient Reactions in Lignin During Pulping and Bleaching. *88th Annual PAPTAC Meeting*, A165-A170.
- Bajpai, P. (2012). *Environmentally benign approaches for pulp bleaching* (Segunda Edición ed.). Amsterdam, Holanda: Elsevier B.V.
- Biermann, C. J. (1996). *Handbook of pulping and papermaking*. Oregon, Estados Unidos: Academic Press.
- Briggs, D. G. (1994). *Forest products measurements and conversion factors*. Washington: College of Forest Resources.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (Vol. Cuarta edición). México: McGRAW HILL.
- Chai, X., & Zhu, J. (1999). Rapid pulp kappa number determination using spectrophotometry. *Journal of pulp and paper science*.
- Chávez, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 32.
- Chen, H., & Wang, L. (2017). *Technologies for Biochemical Conversion of Biomass*. Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802417-1.00003-X>.
- Ek, M., Gellerstedt, & Henriksson. (2009). *Wood chemistry and wood biotechnology*. Suecia: De Gruyter. doi:<https://doi.org/10.1515/9783110213409>
- Evans, J., Venkatesh, V., Gratzl, J., & Chang, H. (1979). *Tappi J.* 62 (6 ed., Vol. 62).
- (FAO), F. a. (2019). *Banana Market Review 2019*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ca7567en/ca7567en.pdf>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1984). Wood-chemistry, ultrastructure, reactions. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 42(8), 314. doi:[doi:10.1007/bf02608943](https://doi.org/10.1007/bf02608943)
- Gallo, R. (1972). Composición química inorgánica del banano (*Musa acuminata*). *Ciencia y Cultura*, 24(1), 70-79.
- Guay, D., Cole, B., Fort, J., Genco, J., & Hausman, M. C. (1999). Mechanisms of Oxidative Degradation of Carbohydrates during Oxygen Delignification. *I.S.W.P.C.*
- Ibrahim, M., Alaam, M., El-Haes, H., Jalbout, A. F., & de Leon, A. (2006). Analysis of the structure and vibrational spectra of glucose and fructose. *Eclética Química*, 313.

- Instituto Nacional de Estadística (INE) . (2019). *Estadísticas agropecuarias continuas 2019*. Obtenido de <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2020/12/03/20201203160005QL4dMFKDwxMZkfk1gTiHClmLsdYdyRgL.pdf>
- Lauwaert, J., Stals, I., Lancefield, C. S., Deschaumes, W., Depuydt, D., Vanlerberghe, B., . . . Verberckmoes, A. (2019). Pilot scale recovery of lignin from black liquor and advanced characterization of the final product. *Elsevier*, 221, 226-235. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.081>
- Li, J., & Gellerstedt, G. (1998). Kinetics and mechanism of kappa number determination. *Nordic pulp & paper research journal*, 13(2), 147-152. doi:10.3183/npprj-1998-13-02
- Lu, F., & John, R. (2010). *Lignin*. In S. Run-Cang, *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biochemicals and Biofuels*. (Primera Edición ed.). Amsterdam: Elsevier B.V.
- McDonough, T. (1992). Mechanism of Nitrogen Dioxide Pretreatment for Oxygen Bleaching of Kraft Pulp. *Journal Jpn.*, 38(6), 570-578.
- McDonough, T., Gierer, J., & Imsgard, F. (1990). Oxygen delignification In Tappi bleach plant operations short course. 80(16), 516.
- Merck Millipore. (octubre de 2021). *Hidróxido de sodio en lentejas puro EMPLURA*. Obtenido de [https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Sodium-hydroxide,MDA\\_CHEM-106462#anchor\\_orderingcomp](https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Sodium-hydroxide,MDA_CHEM-106462#anchor_orderingcomp)
- MINECO], M. d. (2018). *Exportaciones de manufacturas de papel y cartón*. Obtenido de [https://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/exportacion\\_de\\_manufacturas\\_de\\_papel\\_y\\_carton\\_noviembre\\_2018.pdf](https://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/exportacion_de_manufacturas_de_papel_y_carton_noviembre_2018.pdf)
- [MINECO], M. d. (2018). *Manufacturas de papel y cartón. De acuerdo con la clasificación del Banco de Guatemala*. . Obtenido de [www.mineco.gob.gt/sites/default/files/manufacturas\\_papel\\_y\\_carton.pdf](http://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/manufacturas_papel_y_carton.pdf)
- Mohammad, J., & Keikhosro, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *Int J Mol Sci*, 9(9), 1621-1651.
- Muryanto, Eka, T., Haznan, A., Agung, C., Effendi, T., & Yanni, S. (2015). Alkaline delignification of oil palm empty fruit bunch using black liquor from pretreatment. *Procedia Chemistry Elsevier*, 16, 99-105. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.032>
- Nam, H. Y., Lee, K. Y., Kim, J. M., Chio, S. K., Park, J. H., & Choi, I. K. (2001). Experimental study on the emissivity of stainless steel. *Proceedings of the Korean Nuclear Society spring meeting*. Korea Republic.
- Olm, L., & Teder, A. (1979). *Tappi J.* 62(12), 43.
- Ordoñez, K. (2019). *Caracterización fisicoquímica de los residuos de plátano y el café para su posible uso como materias primas en la fabricación de papel*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24795/Ordo%F1ezPinedaKarenLizethSep%FAlvedaMonroyCamila2020.pdf;jsessionid=CAA78CB2144B0CE7ADCD73DBA7C2A62E?sequence=1>
- Petit-Breuilh, Zaror, X., & Melo, R. (2004). Hexenuronic acid removal from unbleached kraft eucalyptus pulp by peroxy monosulfuric acid. (U. C. Temuco, Ed.) *Journal of Chilean Chemical Society*, 49(3), 197-202. doi:10.4067/S0717-97072004000400016
- Ragauskas, A. (2005). High selectivity oxygen delignification. *Institute of paper science and technology*.

- Rowell, R., Pettersen, R., & Tshabalala, M. (2012). *Cell Wall Chemistry*. Boca Ratón , Florida, Estados Unidos: CRC Press Routledge Handbooks Online. doi:9781439853801
- Samayoa, A. (2021). *Evaluación del proceso de laminado, prensado y secado de pasta deslignificada y blanqueada de celulosa de raquis de banano*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Sarria, R., Gallo, J., & Benítez, R. (2018). Condiciones óptimas de deslignificación de la serrín de Pinus patula como etapa crucial en la obtención de bioetanol. *Informador Técnico*, 82(2), 160-171. doi:0000-0003-1295-7865
- SDBS, S. D. (s.f.). *mass spectrum*(No.: 1188), RN 57-50-1. Recuperado el 11 de 01 de 2022, de [https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/direct\\_frame\\_top.cgi](https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/direct_frame_top.cgi)
- Serrano, L.-w. (2021). *Evaluación de decoloración en pulpa celulósica deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo ECF y TCF*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Velásquez, A., Mendizábal, M., Ramos, M., & Guarca, S. (2016). *Diseño de una toalla sanitaria biodegradable a partir del tallo de la planta de banano. Fase desarrollo*. Guatemala: Universidad del Valle.
- Yang, Y., Zhang, Y., Lang, Y., & Yu, M. (2017). Structural ATR-IR analysis of cellulose fibers prepared from a NaOH complex aqueous solution. *College of Materials Science and Engineering, Donghua University*. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012039

## XII. Anexo

### A. Datos obtenidos

#### 1. Propiedades iniciales del raquis de banano

Cuadro 7. Datos obtenidos para la evaluación de características geométricas de raquis de banano entero sin triturar entregado por bananera.

Raquis	Masa $\pm 0.005$ kg	Diámetro inferior $\pm 0.005$ cm	Diámetro superior $\pm 0.005$ cm	Largo $\pm 0.005$ cm
1	1.660	6.900	5.000	57.900
2	2.600	7.700	5.000	80.000
3	2.100	8.000	4.600	64.200
4	1.860	8.000	6.200	54.800

La muestra de raquis pertenece a un tiempo de dos semanas desde su brote en la planta de banano. Las muestras se analizaron según la metodología descrita en el apartado A. El diámetro inferior se refiere al extremo ancho raquis y el diámetro superior al extremo angosto al proponer una figura geométrica cónica.

Cuadro 8. Datos obtenidos para evaluación de características geométricas de raquis de banano triturado sin prensar entregado por bananera.

Muestra	Largo ±0.005 cm	Ancho ±0.005 cm	Grosor ±0.005 cm
1	3.17	0.60	0.01
2	1.50	0.56	0.02
3	2.47	0.47	0.25
4	2.13	0.36	0.07
5	3.45	0.15	0.97
6	2.20	0.48	0.22
7	3.40	1.37	0.04
8	1.23	0.39	0.14
9	3.21	0.06	0.16
10	2.55	0.48	0.14

La muestra de raquis pertenece a un tiempo de dos semanas desde su brote en la planta de banano. Las muestras se tomaron aleatoriamente y se analizaron según la metodología descrita en el apartado A.

Cuadro 9. Datos para la evaluación de características geométricas de trozos de raquis de banano previamente triturado y prensado por la bana nera.

Muestra	Largo ±0.005 cm	Ancho ±0.005 cm	Espesor ±0.005 cm
1	2.27	0.67	0.47
2	3.25	0.44	0.13
3	1.74	0.60	0.16
4	1.93	0.14	0.06
5	1.60	0.24	0.23
6	1.07	0.74	0.03
7	2.14	0.35	0.14
8	1.75	0.20	0.05
9	2.51	0.35	0.03
10	1.57	0.12	0.12
11	2.26	0.54	0.37
12	2.23	0.44	0.21
13	2.66	0.57	0.05
14	1.98	0.45	0.23
15	1.05	0.27	0.17
16	2.21	0.56	0.25
17	1.27	0.41	0.13
18	1.37	0.50	0.22
19	1.02	0.45	0.07
20	1.66	0.20	0.07
21	2.06	0.58	0.22
22	1.30	1.28	0.33
23	1.30	0.66	0.23
24	1.24	0.50	0.14
25	1.50	0.52	0.05
26	1.34	0.41	0.12
27	1.23	0.24	0.12
28	1.42	0.14	0.05
29	1.23	0.20	0.06
30	1.12	0.35	0.22

La muestra de raquis pertenece a un tiempo de dos semanas desde su brote en la planta de banano. Las muestras se tomaron aleatoriamente y se analizaron según la metodología descrita en el apartado A.

Cuadro 10. Datos de humedad inicial de trozos de raquis previamente triturado y prensado entregado por bananera.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005\text{g}$	Humedad (%)
1	0.521	89.25%
2	0.509	89.00%
3	0.528	88.45%
4	0.508	91.14%
5	0.505	88.91%
6	0.511	89.04%
	Media	89.30%
	Desviación Estándar	0.009

El proceso de obtención de la muestra fue aleatorio respecto a una muestra de raquis con dos semanas de cultivo (ver metodología sección B). La humedad de cada muestra está expresada con base húmeda y se obtuvo con una termobalanza marca OHAUS modelo MB120.

Cuadro 11. Datos de humedad inicial de trozos de raquis previamente triturado y sin prensar entregado por la bananera.

Muestra	Masa inicial (g)	% Humedad
1	0.505	91.29%
2	0.503	93.64%
3	0.508	93.50%
	Media	92.81%
	Desviación Estándar	0.013

El proceso de obtención de la muestra fue aleatorio respecto a una muestra de raquis con dos semanas de cultivo (ver metodología sección B). La humedad de cada muestra está expresada con base húmeda se obtuvo con una termobalanza marca OHAUS modelo MB120. Las mediciones corresponden a raquis triturado con exceso de humedad entregado por bananera.

Cuadro 12. Datos de humedad final de trozos de raquis previamente triturado, prensado y seco en deshidratador industrial.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	% Humedad
1	0.511	13.11%
2	0.503	10.93%
3	0.516	13.95%
4	0.506	30.83%
5	0.508	9.45%
6	0.509	15.52%
7	0.512	4.10%
	Media	13.98%
	Desviación Estándar.	0.083

El proceso de obtención de la muestra fue aleatorio respecto a una muestra de raquis con dos semanas de cultivo (ver metodología sección B). La humedad de cada muestra está expresada con base húmeda y se obtuvo con una termobalanza marca OHAUS modelo MB120 (ver metodología sección B). Las mediciones corresponden a raquis triturado y seco a 130 °C por un deshidratador industrial marca Corbett industries (ver metodología A.1.).

Cuadro 13. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final ±0.005g	Humedad final (%)
1	5.161	4.50	5.34%
2	5.161	4.80	2.45%
3	10.32	9.20	4.23%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 3.00%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología sección B), así como la humedad final expresada con base húmeda. La cantidad de extraíbles se extrajo utilizando un sistema Soxhlet binario por 6 horas (ver metodología sección B.3.). La masa final de muestra corresponde a la fibra libre de extraíbles y seca (ver metodología sección B.3.).

Cuadro 14. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final ±0.005g	Humedad final (%)
1	5.505	5.03	4.01%
2	4.731	4.50	2.34%
3	5.161	5.01	2.94%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 13.98%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final con base húmeda. La cantidad de extraíbles se extrajo utilizando un sistema Soxhlet binario por 6 horas (ver metodología B.3.). La masa final de muestra corresponde a la fibra libre de extraíbles y seca (ver metodología B.3.)

Cuadro 15. Datos para la determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final ±0.005g	Humedad final (%)
1	5.075	0.669	2.16%
2	5.075	0.700	3.07%
3	3.384	0.600	2.43%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 15.41%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final con base húmeda. La cantidad de extraíbles se extrajo utilizando un sistema Soxhlet binario por 6 horas (ver metodología B.3.). La masa final de muestra corresponde a la fibra libre de extraíbles y seca (ver metodología B.3.)

Cuadro 16. Datos para la determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005\text{g}$	Masa final $\pm 0.005\text{g}$	Humedad final (%)
1	0.928	0.669	4.91%
2	0.928	0.700	13.9%
3	0.928	0.600	6.11%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 7.2%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final con base húmeda. La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología B.4.). La masa final de muestra corresponde a la cantidad de  $\alpha$ -celulosa en la muestra original seca (ver metodología B.4.)

Cuadro 17. Datos para la determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005\text{g}$	Masa final $\pm 0.005\text{g}$	Humedad final (%)
1	0.978	0.750	1.77%
2	0.978	0.715	1.66%
3	0.978	0.741	1.95%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 2.21%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final en base húmeda. La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles. La masa final de muestra corresponde a la cantidad de  $\alpha$ -celulosa en la muestra original seca (ver metodología B.4.)

Cuadro 18. Datos para la determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005\text{g}$	Masa final húmeda $\pm 0.005\text{g}$	Humedad final (%)
1	0.958	0.714	5.10%
2	0.958	0.753	4.73%
3	0.958	0.791	3.31%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad húmeda de 4.2%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final en base húmeda. La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles. La masa final de muestra corresponde a la cantidad de  $\alpha$ -celulosa en la muestra original seca (ver metodología B.4.).

Cuadro 19. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final ±0.005g	Humedad final(%)
1	1.94	0.200	2.23%
2	1.94	0.300	3.12%
3	1.94	0.400	2.45%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 3.00%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), así como la humedad final en base húmeda. La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles. La masa final de muestra corresponde a la cantidad de lignina Klason total en la muestra inicial seca (ver metodología sección B.5.)

Cuadro 20. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final húmeda ±0.005g	Humedad final (%)
1	1.761	0.2431	1.16%
2	1.762	0.2575	1.34%
3	1.762	0.2308	1.25%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 12.1%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología sección B.2.), así como la humedad final con base húmeda. La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles. La masa final de muestra corresponde a la cantidad de lignina Klason total en la muestra inicial seca (ver metodología sección B.5.) .

Cuadro 21. Datos para la determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-T222 en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Masa final húmeda ±0.005g	Humedad final (%)
1	1.728	0.1681	4.03%
2	1.728	0.2850	5.23%
3	1.728	0.2919	3.68%

La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 13.58%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología B.2.), con base húmeda. La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles. La masa final de muestra corresponde a la cantidad de lignina Klason total en la muestra inicial seca (ver metodología B.5.).

## 2. Resultados durante deslignificación de raquis de banano

Cuadro 22. Valores de pulpa ingresados, licor y pulpa obtenida al finalizar el proceso de deslignificación por cocción alcalina con NaOH para cálculo de rendimiento.

Razón de NaOH g/100g pulpa	Tiempo de cocción (min)	Pulpa inicial $\pm 0.005$ g	Licor residual $\pm 0.005$ L	Pulpa final húmeda $\pm 0.005$ g	Pulpa final seca $\pm 0.005$ g
8%	100	100	1.33	700	55.93
8%	130	100	1.36	600	49.02
8%	150	100	1.46	560	41.54
10%	100	100	1.20	540	37.41
10%	130	150	2.50	1160	65.09
10%	150	100	1.41	540	37.34
12%	130	100	1.50	460	41.24
14%	130	100	1.00	480	38.79

El licor residual obtenido se determinó utilizando una probeta de 100 mL al finalizar la cocción, previo al lavado de la pulpa deslignificada (ver metodología sección C). La pulpa final húmeda corresponde a la cantidad de pulpa obtenida después de la cocción previo al proceso de lavado (ver metodología sección C.2.). La pulpa final corresponde a la cantidad de pulpa seca a 105 °C en un horno obtenida después del proceso de cocción y lavado. El licor obtenido presentó un pH en rangos de 12-13.5.

### 3. Datos de evaluación de pulpa celulósica después de proceso de cocción.

Cuadro 23. Datos para la obtención de consistencia de pulpa de raquis de banano previamente triturado y prensado después de deslignificación con NaOH.

Razón g NaOH/100g pulpa	Tiempo de cocción (min)	Masa de pulpa total ±0.005g	Masa de muestra ±0.005g	Humedad final (%)	Masa de pulpa seca ±0.005g
8%	100	7360	1340	3.58%	8.774
8%	130	6020	1240	4.14%	5.656
8%	150	4620	1220	3.73%	7.028
10%	100	6460	417.5	6.37%	4.026
10%	130	6640	500.8	9.23%	5.416
10%	150	7600	1280	3.70%	5.971
12%	130	6740	567.5	3.59%	6.074
14%	130	5080	435.4	7.57%	4.067

La masa de pulpa total es referente a una muestra tomada del total de pulpa diluida en agua según el método Tappi T-240 (ver metodología D.1.). La masa de muestra es la porción de pulpa obtenida como muestreo de la pulpa total (ver metodología D.1.). La humedad final presentada es respecto a base húmeda de muestra.

Cuadro 24. Lecturas con espectrofotometría para el cálculo del número kappa de la pulpa de raquis de banano seca previamente deslignificada por cocción alcalina.

Razón g NaOH/100g pulpa	Tiempo (min)	Masa ±0.005g	0 min A	0 min B	0 min C	10 min A	10 min B	10 min C
0	0	0.100	0.624	0.538	0.527	0.0755	0.0773	0.0786
8	60	0.119	0.715	0.701	0.692	0.0139	0.0131	0.0140
8	100	0.144	0.743	0.731	0.724	0.0242	0.0237	0.0257
8	130	0.135	0.761	0.725	0.718	0.0409	0.0317	0.0306
8	150	0.114	0.869	0.857	0.850	0.0429	0.0375	0.0367
10	100	0.122	1.465	1.450	1.434	0.1738	0.1620	0.1444
10	130	0.111	1.653	1.666	1.663	0.4443	0.4180	0.3941
10	150	0.114	1.524	1.505	1.479	0.1500	0.1331	0.1089
12	100	0.132	0.642	0.620	0.605	0.0360	0.0405	0.0362
12	130	0.118	1.356	1.340	1.329	0.0919	0.0863	0.0809
14	130	0.112	0.798	0.787	0.747	0.0745	0.0735	0.0621

La masa es la cantidad de pulpa de raquis de banano deslignificada y seca ingresada a la reacción de oxidación con permanganato de potasio. Se realizó un triplicado de la lectura para la misma muestra a los 0 minutos y 10 minutos de la reacción, ya que según el método estandarizado la oxidación estará completa al terminar los 10 minutos de reacción (ver metodología sección D.2.).

Cuadro 25. Resultado de valoración de licor para determinación de cantidad de hidróxido de sodio consumido durante reacción de deslignificación.

Prueba	Volumen de HCl consumido (±0.05 mL)
1	9.3
2	10.7
3	10.2

La cantidad de hidróxido de sodio se determinó para el balance de masa y energía por valoración del licor de cocción resultante con una solución de HCl 0.125 N. El licor evaluado presentó un pH de 13.24.

## B. Cálculos de muestra

### 1. Evaluación de raquis inicial previo a deslignificación

Cálculo 1. Volumen de raquis de banano sin triturar entregado por bananera.

$$V = \pi \left( \frac{Di}{Ds} \right)^2 L = \pi \left( \frac{6.900 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}} \right)^2 (57.9 \text{ cm}) = 2165.043 \text{ cm}^3$$

[Ec. 1]

1. Este cálculo se utilizó para el volumen de cada muestra de raquis entero sin triturar entregado por la bananera (ver Cuadro 3 en datos obtenidos)
2. La ecuación pertenece al volumen un cono ya que se propuso esta figura para el modelo de las dimensiones de raquis de banano.
3. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 2. Densidad de raquis de banano sin triturar entregado por bananera.

$$\rho = \left( \frac{m}{V} \right) = \frac{1.660 \text{ kg}}{2165.043 \text{ cm}^3} = 0.00077 \text{ kg/cm}^3$$

[Ec. 2]

- I. Este cálculo se utilizó para la densidad de cada muestra de raquis de banano entero sin triturar entregado por la bananera, así como para la evaluación de los trozos de raquis de banano prensado, sin prensar y después de triturar (ver Cuadro 3 de datos obtenidos).
- II. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 3. Volumen de trozos de raquis de banano previamente triturado prensado y sin prensar entregado por bananera.

$$V = L * A * E = (2.27 \text{ cm})(0.67 \text{ cm})(0.47 \text{ cm}) = 0.71 \text{ cm}^3$$

[Ec. 3]

1. Este cálculo se utilizó para el volumen de cada trozo de raquis de banano después de triturar sin prensar y prensado entregado por bananera (ver Cuadros 4 y 5 de datos obtenidos)
2. La ecuación pertenece al volumen de un rectángulo ya que se propuso esta figura para el modelo de las dimensiones de cada trozo de raquis de banano después de triturar.
3. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 4. Cuantificación de la cantidad de extraíbles presentes en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \text{ Extraíbles} = \frac{m_f - (m_f * H)}{m_o - (m_o * H)} * 100 = \frac{4.5 \text{ g} - (4.5 \text{ g} * 0.0534)}{5.161 \text{ g} - (5.161 * 0.1398)} * 100 \% = 17.46 \%$$

[Ec.4]

1. Este cálculo se utilizó para cada muestra de raquis en el triplicado de evaluación de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno (ver Cuadros 9, 10 y 11 en datos obtenidos)
2. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 5. Cuantificación de  $\alpha$ -celulosa presente en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \alpha\text{-celulosa} = \frac{m_f - (m_f * H)}{m_o - (m_o * H)} * 100 = \frac{0.669 \text{ g} - (0.669 \text{ g} * 0.05)}{1 \text{ g} - (1 \text{ g} * 0.072)} = 68.59 \%$$

[Ec. 5]

1. Este cálculo se utilizó para cada muestra de raquis en el triplicado de evaluación de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con NaOH (ver Cuadros 12, 13 y 14 en datos obtenidos)
2. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 6. Cuantificación de lignina presente en raquis de banano triturado, prensado y seco.

$$\% \text{ Lignina} = \frac{m_f - (m_f * H)}{m_o - (m_o * H)} * 100 = \frac{0.2 \text{ g} - (0.2 \text{ g} * 0.023)}{2 \text{ g} - (2 \text{ g} * 0.03)} * 100 = 10.08 \%$$

3. [Ec. 6]

- I. Este cálculo se utilizó para cada muestra de raquis en el triplicado de evaluación de lignina por el método Tappi – T222 (ver Cuadros 15,16 y 17 en datos obtenidos)
- II. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

## 2. Resultados de proceso de deslignificación de raquis de banano

Cálculo 7. Cantidad de hidróxido de sodio agregado durante la deslignificación de raquis de banano por cocción alcalina.

$$\text{Carga de hidróxido de sodio} = m_p * 0.08 = 0.100 \text{ kg} * 0.08 = 0.008 \text{ kg de NaOH} = 8 \text{ g NaOH}$$

[Ec. 7]

1. Este cálculo se utilizó para conocer la cantidad de hidróxido de sodio a agregar para realizar la deslignificación de cada muestra de raquis triturado y seco al 8%, 10%, 12% y 14% de carga de NaOH y tiempos de 100, 130 y 150 minutos (ver Cuadro 18 en datos obtenidos)
2. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 8. Volumen de agua agregado durante la deslignificación de raquis de banano por cocción alcalina.

$$\text{Volumen de agua} = m_p \left( \frac{1}{\rho} \right) * 8 = 0.100 \text{ kg} \left( \frac{1 \text{ ml}}{0.0004 \text{ kg}} \right) * 8 = 2,000 \text{ ml} = 2 \text{ L de H}_2\text{O}$$

[Ec. 8]

1. Este cálculo se utilizó para conocer la cantidad de hidróxido de sodio a agregar para realizar la deslignificación de cada muestra de raquis triturado y seco al 8%, 10%, 12% y 14% de carga de NaOH y tiempos de 100, 130 y 150 minutos (ver Cuadro 18 en datos obtenidos)
2. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

### 3. Evaluación de pulpa celulósica obtenida en proceso de deslignificación

Cálculo 9. Rendimiento de pulpa después de deslignificación por cocción alcalina.

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{m_d}{m_p} * 100 = \frac{55.93 \text{ g}}{100 \text{ g}} * 100 = 55.93 \%$$

[Ec. 9]

1. Este cálculo se utilizó para el rendimiento de cada una de las pruebas de deslignificación con cargas de NaOH de 8%, 10%, 12%, 14% y tiempos de 100, 130 y 150 minutos (ver Cuadro 18 en datos obtenidos).
2. La descripción de las variables de la ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones en el marco teórico.

Cálculo 10. Consistencia de muestreo de pulpa por metodología TAPPI-T240 después de deslignificación por cocción alcalina.

$$p = \frac{w - f}{g} * 100 = \frac{8.77 \text{ g}}{480 \text{ g}} = 1.83 \%$$

[Ec. 10]

1. Este cálculo se realizó para cada una de las pruebas de deslignificación al 8%, 10%, 12% y 14% de carga de NaOH y tiempos de 100, 130 y 150 minutos.
2. Este cálculo se encuentra descrito en la ecuación en la sección de marco teórico y corresponde al método TAPPI-T240 (ver Cuadro 19 de datos obtenidos).
3. Este cálculo es específico para el muestreo de pulpa respecto al total de pulpa obtenida (ver metodología D.1.)

Cálculo 11. Consistencia total de pulpa por metodología TAPPI-T240 después de deslignificación por cocción alcalina.

$$c = p * \left(\frac{W}{w}\right) = 1.83\% * \frac{7360 \text{ g}}{480 \text{ g}} = 28.03 \%$$

[Ec. 11]

1. Este cálculo se realizó para cada una de las pruebas de deslignificación al 8%, 10%, 12% y 14% de carga de NaOH y tiempos de 100, 130 y 150 minutos.
2. Este cálculo se encuentra descrito en la ecuación en la sección de marco teórico y corresponde al método TAPPI-T240 (ver Cuadro 19 de datos obtenidos)-
3. Este cálculo es específico para la pulpa total obtenida después de la cocción alcalina partiendo del muestreo en dilución (ver metodología D.1.)

Cálculo 12. Número Kappa obtenido por espectrofotometría por reacción de oxidación con permanganato de potasio.

$$K = \frac{a}{w} \left(1 - \frac{A_e}{A_0}\right) = \frac{5}{0.100} \left(1 - \frac{0.0755}{1.2}\right) = 46.840$$

[Ec. 12]

1. Este cálculo se aplicó para obtener el número kappa de todas las muestras de pulpa deslignificada con cargas de NaOH de 8%, 10%, 12%, 14% y tiempos de deslignificación de 100, 130 y 150 minutos (ver Cuadro 20 de datos obtenidos.)
2. La descripción de variables para esta ecuación se encuentra en el apartado de ecuaciones del marco teórico.

Cálculo 13. Código de programación en lenguaje Python para determinación de cinética de reacción de deslignificación.

```

import numpy as np
import pandas as pd
import plotly.express as px
import plotly.graph_objects as go
cas = [46.77207949, 41.53828198, 34.01234568, 35.97530864, 42.40695285]
def model1(ca, k1, k2, n1, n2):
    model = (-k1 * np.power(ca, n1)) + (k2 * (np.power(ca, n2)))
    return model
model1(cas, 30, 34, 2, 3)
def error(true, pred):
    out = np.divide(np.abs(np.subtract(true, pred)), true)
    return np.mean(out*100)
def p(i):
    cas = [46.77207949, 41.53828198, 34.01234568, 35.97530864, 42.40695285]
    ks1 = np.arange(0, 10, 0.1)
    ks2 = np.arange(0, 10, 0.1)
    ns1 = np.arange(0, 1, 0.1)
    ns2 = np.arange(0, 1, 0.1)
    np.random.shuffle(ks1)
    np.random.shuffle(ns1)
    np.random.shuffle(ks2)
    np.random.shuffle(ns2)
    models = []
    errores = []
    params = []
    for k1, k2, n1, n2 in zip(ks1, ks2, ns1, ns2):
        out = model1(cas, k1, k2, n1, n2)
        errors = error(cas, out)
        models.append(out)
        errores.append(errors)
        params.append([k1, k2, n1, n2])
    df = pd.DataFrame()
    df['Error'] = errores
    df['Params'] = params
    df['Out'] = models
    df.to_csv('exp'+str(i)+'.csv', index=False)
    return df.sort_values('Error', ascending=True)
for i in range(1, 20):
    p(i)
def plot(model_output):
    dff = pd.DataFrame()
    dff['True'] = cas
    dff['Model'] = model_output
    dff['T'] = [0, 60, 100, 130, 150]
    df = pd.melt(dff, id_vars=['T'], value_vars=['True', 'Model'], var_name='Tipo')
    fig = px.scatter(df, x='T', y='value', color='Tipo')
    fig.update_layout(template='simple_white', legend=dict(orientation="h", yanchor="top", y=0.99, xanchor="right", x=0.5))
    return fig
plot([45.08691675, 42.45583709, 38.36303746, 39.47077617, 42.90351589])

```

El código fue ejecutado utilizando Google Colab por su accesibilidad a las librerías de numpy, pandas y matplotlib del lenguaje Python. El código utiliza el modelo propuesto por la cinética de la reacción de extracción de lignina por cocción alcalina descrita en el marco teórico ecuación 13. Dentro del código se hacen combinaciones aleatorias para las variables  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $n_1$  y  $n_2$  para encontrar el conjunto de variables que ajuste a los datos originales del número kappa de la pulpa con el menor porcentaje de error posible.

#### 4. Balance de energía

Cálculo 14. Temperatura de película para pérdidas de energía por convección en balance de energía.

$$T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty) = \frac{1}{2}(95.29 + 25.4)^\circ\text{C} = 60.345^\circ\text{C}$$

[Ec. 18]

1. Este cálculo se realizó para la evaluación de las pérdidas de energía por convección natural en la olla de acero vitrificado utilizada durante cocción alcalina.
2. Utilizando esta temperatura se determinó (Tabla A-15):
  - o  $k = 0.02808 \text{ W/m K}$
  - o  $\nu = 1.90 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
  - o  $\text{Pr} = 0.7202$

(Cengel & Ghajar, 2011)

Cálculo 15. Factor  $\beta$  para pérdidas de energía por convección en balance de energía

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(60.345 + 273.15)\text{K}} = 0.0030 \text{ K}^{-1}$$

[Ec. 19]

Cálculo 16. Número de Grashof para pérdidas de energía por convección en balance de energía.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(0.030 \text{ K}^{-1})(95.29^\circ\text{C} - 25.4^\circ\text{C})(0.4 \text{ m})^3}{\left(\frac{1.90 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{\text{s}}\right)^2} = 3.66 \times 10^8$$

[Ec. 20]

Cálculo 17. Determinación de aproximación para modelo de placas planas verticales en pérdidas por convección en balance de energía.

$$D \geq \left(\frac{35L}{Gr_L^{\frac{1}{4}}}\right) = \frac{35(0.4\text{m})}{(3.66 \times 10^8)^{\frac{1}{4}}} = 0.1012$$

[Ec. 21]

1. Con este cálculo se verificó que la olla como cilindro vertical se puede tratar como una placa vertical porque  $0.38 \text{ m} > 0.1012$ .

Cálculo 18. Número de Rayleigh para pérdidas de energía por convección en balance de energía.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{\left(\frac{9.81m}{s^2}\right)(0.0030K^{-1})(95.29^\circ C - 25.4^\circ C)(0.4)^3}{\left(\frac{1.90 \times 10^{-5} m^2}{s}\right)^2} (0.7202) = 2.64 \times 10^8$$

[Ec. 22]

Cálculo 19. Número de Nusselt para pérdidas de energía por convección en balance de energía.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (2.64 \times 10^8)^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left(\frac{0.492}{0.7202}\right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 81.88$$

[Ec. 23]

1. Este cálculo se realizó tomando el modelo de una placa vertical con un intervalo de número de Rayleigh entre  $10^4 - 10^9$ .

Cálculo 20. Coeficiente de convección natural para balance de energía

$$h = \frac{Nuk}{Lc} = \frac{(81.88) \left(0.02808 \frac{W}{m K}\right)}{0.4 m} = 5.748 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

[Ec. 24]

Cálculo 21. Pérdidas de energía por convección natural durante cocción alcalina con hidróxido de sodio.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) = \left(5.748 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (0.4775 m^2) (95.29^\circ C - 25.4^\circ C) = 191.83 W$$

[Ec. 25]

Cálculo 22. Pérdidas de energía por radiación durante cocción alcalina con hidróxido de sodio.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{rad} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \\ &= (0.495) \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right) (0.48 m^2) ((95.29 + 273.15)^4 - (25.4 + 273.15)^4) K^4 = 339.17 W \end{aligned}$$

[Ec. 26]

1. La emisividad se obtuvo teóricamente para acero inoxidable. (Nam, y otros, 2001)

Cálculo 22. Pérdidas de energía por evaporación de agua durante cocción alcalina con hidróxido de sodio.

$$\dot{Q}_{vap} = \dot{m}H_{fg} = \left(0.0002179 \frac{kg}{s}\right) \left(2224.5 \frac{kJ}{kg}\right) = 0.4848 kW = 484.83 W$$

[Ec. 27]

Cálculo 23. Energía consumida por reacción de deslignificación de raquis de banano previamente triturado.

$$\dot{Q}_{rxn} = 1050 W - 191.83 W - 339.17 W - 484.83 W = 34.18 W$$

[Ec. 28]

## C. Propagación de error

Cálculo 24. Propagación de error de una suma o resta

$$R = X + Y - Z$$

$$\delta R = \sqrt{(\delta X)^2 + (\delta Y)^2 + (\delta Z)^2}$$

$$\delta R = \sqrt{(0.0005)^2 + (0.0005)^2 + (0.0005)^2} = 0.000866025$$

Observaciones:

1. Este cálculo se utilizó para cualquier operación de adición o sustracción involucrada en los resultados.

Cálculo 25. Propagación de error de una multiplicación o división

$$R = \frac{X * Y}{Z}$$

$$\begin{aligned} \delta R &= |R| * \sqrt{\left(\frac{\delta X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{Z}\right)^2} = (2165.043 \text{ cm}^3) * \sqrt{\left(\frac{0.0005 \text{ cm}}{6.9 \text{ cm}}\right)^2 + \left(\frac{0.0005 \text{ cm}}{57.90 \text{ cm}}\right)^2} \\ &= 1.58 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Observaciones:

1. Este cálculo se utilizó para cualquier operación de multiplicación o división involucrada en los resultados.

## D. Datos Intermedios

### 1. Evaluación de propiedades de raquis de banano previo a deslignificación

Cuadro 26. Evaluación de características geométricas de raquis de banano entero sin triturar entregado por bananera.

Raquis	Masa $\pm 0.005$ kg	Diámetro inferior $\pm 0.005$ cm	Diámetro superior $\pm 0.005$ cm	Largo $\pm 0.005$ cm	Volumen ( $\text{cm}^3$ )	Densidad ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )
1	1.660	6.900	5.000	57.900	$2165.04 \pm 0.00073$	$0.00077 \pm 0.0030$
2	2.600	7.700	5.000	80.000	$3725.30 \pm 0.00065$	$0.00070 \pm 0.0019$
3	2.100	8.000	4.600	64.200	$3227.04 \pm 0.00063$	$0.00065 \pm 0.0024$
4	1.860	8.000	6.200	54.800	$2754.54 \pm 0.00063$	$0.00068 \pm 0.0027$
Media	2.055	7.650	5.200	64.225	2967.98	0.00070
Desviación estándar	0.405	0.520	0.693	11.220	666.060	0.0000499

Estas mediciones corresponden a raquis entero con un tiempo de cultivo de 2 semanas. Para el cálculo del volumen se supuso una figura cónica como aproximación de la geometría total del residuo (ver metodología A y cálculo de muestra 1).

Cuadro 27. Evaluación de características geométricas de raquis de banano triturado sin prensar entregado por bananera.

Muestra	Largo ±0.005 cm	Ancho ±0.005 cm	Grosor ±0.005 cm	Volumen (cm <sup>3</sup> )
1	3.17	0.60	0.01	0.02±0.010
2	1.50	0.56	0.02	0.02±0.004
3	2.47	0.47	0.25	0.29±0.007
4	2.13	0.36	0.07	0.05±0.004
5	3.45	0.15	0.97	0.52±0.017
6	2.20	0.48	0.22	0.23±0.006
7	3.40	1.37	0.04	0.18±0.023
8	1.23	0.39	0.14	0.17±0.003
9	3.21	0.06	0.16	0.03±0.003
10	2.55	0.48	0.14	0.17±0.006
Media	2.53	0.49	0.20	0.16
Desviación Estándar	0.78	0.35	0.28	0.16

Las mediciones corresponden a raquis triturado con exceso de humedad entregado por bananera. Se propuso una figura rectangular como aproximación geométrica para el cálculo del volumen individual de cada fibra.

Cuadro 28. Evaluación de características geométricas de trozos de raquis de banano previamente triturado y prensado por la bananera.

Muestra	Largo $\pm 0.005$ cm	Ancho $\pm 0.005$ cm	Espesor $\pm 0.005$ cm	Volumen ( $\text{cm}^3$ )
1	2.27	0.67	0.47	0.71 $\pm$ 0.013
2	3.25	0.44	0.13	0.18 $\pm$ 0.041
3	1.74	0.60	0.16	0.16 $\pm$ 0.033
4	1.93	0.14	0.06	0.02 $\pm$ 0.093
5	1.60	0.24	0.23	0.09 $\pm$ 0.031
6	1.07	0.74	0.03	0.02 $\pm$ 0.167
7	2.14	0.35	0.14	0.11 $\pm$ 0.039
8	1.75	0.20	0.05	0.02 $\pm$ 0.096
9	2.51	0.35	0.03	0.02 $\pm$ 0.179
10	1.57	0.12	0.12	0.02 $\pm$ 0.059
11	2.26	0.54	0.37	0.45 $\pm$ 0.017
12	2.23	0.44	0.21	0.21 $\pm$ 0.026
13	2.66	0.57	0.05	0.08 $\pm$ 0.100
14	1.98	0.45	0.23	0.20 $\pm$ 0.025
15	1.05	0.27	0.17	0.05 $\pm$ 0.035
16	2.21	0.56	0.25	0.31 $\pm$ 0.022
17	1.27	0.41	0.13	0.07 $\pm$ 0.041
18	1.37	0.50	0.22	0.15 $\pm$ 0.025
19	1.02	0.45	0.07	0.03 $\pm$ 0.075
20	1.66	0.20	0.07	0.02 $\pm$ 0.076
21	2.06	0.58	0.22	0.26 $\pm$ 0.024
22	1.30	1.28	0.33	0.55 $\pm$ 0.016
23	1.30	0.66	0.23	0.19 $\pm$ 0.024
24	1.24	0.50	0.14	0.08 $\pm$ 0.038
25	1.50	0.52	0.05	0.04 $\pm$ 0.112
26	1.34	0.41	0.12	0.07 $\pm$ 0.042
27	1.23	0.24	0.12	0.04 $\pm$ 0.045
28	1.42	0.14	0.05	0.01 $\pm$ 0.112
29	1.23	0.20	0.06	0.01 $\pm$ 0.092
30	1.12	0.35	0.22	0.09 $\pm$ 0.027
Media	1.7094	0.44	0.16	0.14
Desviación estándar	0.55	0.23	0.11	0.17

Las mediciones corresponden a raquis de banano previamente triturado y prensado por la bananera. Se propuso una figura rectangular como aproximación geométrica para el cálculo del volumen individual de cada fibra. El proceso de obtención de la muestra fue aleatorio respecto a una muestra de raquis con dos semanas de cultivo (ver metodología A.3. y cálculo de muestra 3).

Cuadro 29. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	Extraíbles (% m/m)
1	5.161	5.34	4.260	17.46
2	5.161	2.45	4.682	9.272
3	10.32	4.23	8.811	14.64
		Media		13.79
		Desviación estándar		4.160

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 13.98%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de extraíbles se determinó utilizando un sistema Soxhlet binario (ver metodología B.3. y cálculo de muestra 4)

Cuadro 30. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	Extraíbles (% m/m)
1	5.505	4.01	4.800	12.82
2	4.731	2.34	4.395	7.106
3	5.161	2.94	4.853	5.967
		Media		8.629
		Desviación estándar		3.670

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 13.98%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de extraíbles se determinó utilizando un sistema Soxhlet binario (ver metodología B.3. y cálculo de muestra 4)

Cuadro 31. Determinación de cantidad de extraíbles por Soxhlet Etanol-Tolueno en tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	Extraíbles (% m/m)
1	5.075	2.16	4.324	14.80
2	5.075	3.07	4.449	12.35
3	3.384	2.43	2.987	11.72
		Media		12.96
		Desviación estándar		1.625

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 15.41%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de extraíbles se determinó utilizando un sistema Soxhlet binario (ver metodología B.3. y cálculo de muestra 4).

Cuadro 32. Determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial sin agua ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	$\alpha$ -celulosa (% m/m)
1	0.928	4.91	0.6365	68.59
2	0.928	13.9	0.6024	64.92
3	0.928	6.11	0.5633	60.70
		Media		64.74
		Desviación estándar		3.947

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 7.2%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología B.4. y cálculo de muestra 5)

Cuadro 33. Determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005$ g	Humedad final (%)	Masa final $\pm 0.005$ g	$\alpha$ -celulosa (% m/m)
1	0.9779	1.77	0.7362	75.29
2	0.9779	1.66	0.7028	71.87
3	0.9779	1.95	0.7264	74.28
	Media			73.81
	Desviación estándar			1.754

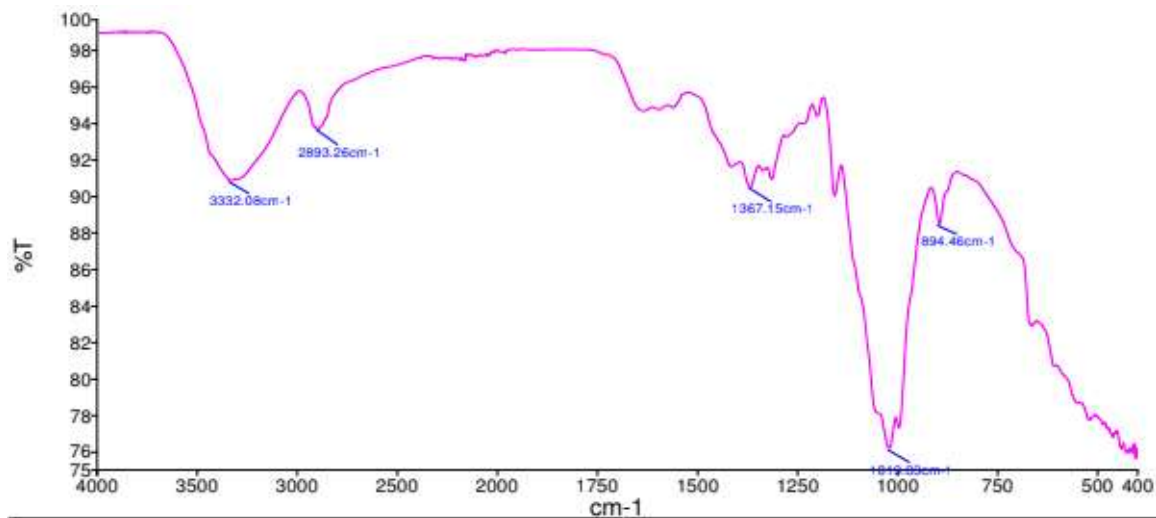
El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 2.21%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología B.4. y cálculo de muestra 5)

Cuadro 34. Determinación de la cantidad de  $\alpha$ -celulosa por desintegración con hidróxido de sodio en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial $\pm 0.005$ g	Humedad final (%)	Masa final $\pm 0.005$ g	$\alpha$ -celulosa (% m/m)
1	0.958	5.10	0.6776	70.73
2	0.958	4.73	0.7170	74.84
3	0.958	3.31	0.7650	79.86
	Media			75.14
	Desviación estándar			4.570

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 4.2%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología sección B.2.). La cantidad de celulosa se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología sección B.4. y cálculo de muestra 5)

Figura 17. Espectro IR de  $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de primera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.

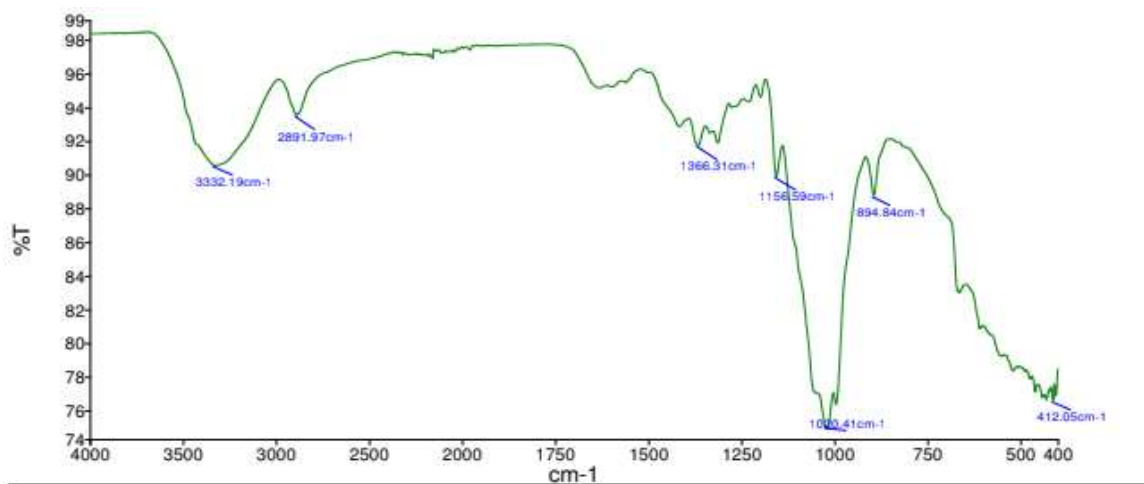


El espectro IR obtenido se comparó con la figura 6 en marco teórico para las verificación de la cuantificación de  $\alpha$ -celulosa.

Cuadro 35. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de primera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.

Pico ( $\text{cm}^{-1}$ )	%T	Grupo funcional
3332.08	91	Banda ancha O-H
2893.26	93	Vibración H-C-H
1367.15	91	Vibración C-H
1019.00	76	Vibración C-O-C
894.46	89	Vibración C-H de carbono anomérico

Figura 18. Espectro IR de  $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de segunda muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.

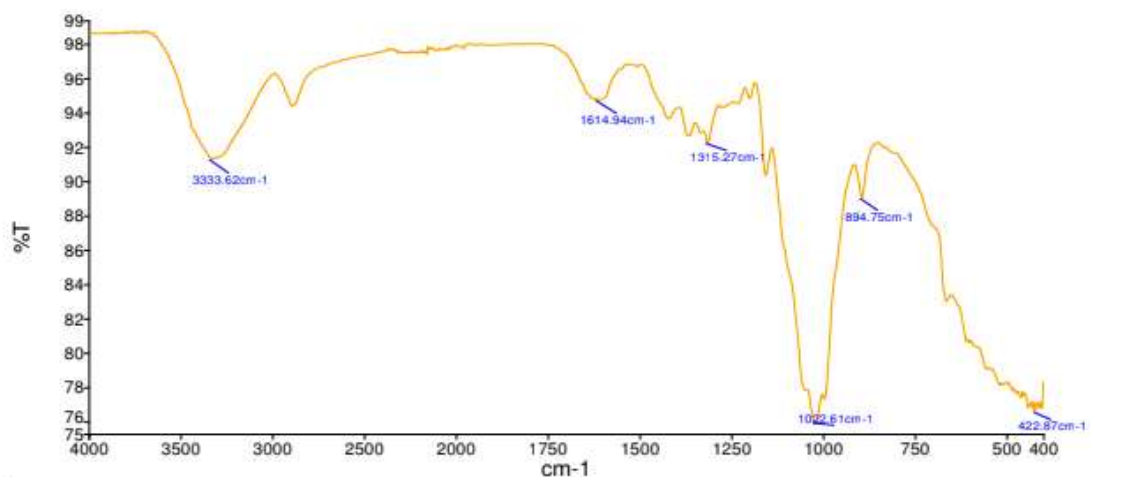


El espectro IR obtenido se comparó con la figura 6 en marco teórico para la verificación de la cuantificación de  $\alpha$ -celulosa.

Cuadro 36. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de segunda muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.

Pico ( $\text{cm}^{-1}$ )	%T	Grupo funcional
3332.19	91	Banda ancha O-H
2891.97	93	Vibración H-C-H
1366.31	91	Vibración C-H
1156.59	90	Estiramiento C-O-C
1020.41	75	Vibración C-O-C
894.84	89	Vibración C-H carbono anomérico

Figura 19. Espectro IR de  $\alpha$ -celulosa para identificación de compuesto después de desintegración alcalina de tercera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.



El espectro IR obtenido se comparó con la figura 6 en marco teórico para la verificación de la cuantificación de  $\alpha$ -celulosa.

Cuadro 37. Identificación de grupos funcionales para muestra seca después de desintegración alcalina de tercera muestra de raquis de banano previamente triturado y seco.

Pico ( $\text{cm}^{-1}$ )	%T	Grupo funcional
3333.62	91	Banda ancha O-H
1614.94	95	Agua adsorbida
1315.27	93	Vibración C-H
1022.61	76	Vibración C-O-C
894.75	89	Vibración C-H carbono anomérico

Cuadro 38. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la primera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final(%)	Masa final ±0.005g	Lignina Klason (% m/m)
1	1.94	2.23	0.1955	10.08
2	1.94	3.12	0.2906	14.98
3	1.94	2.45	0.3902	20.11
		Media		15.06
		Desviación estándar		5.017

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 3.00%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología sección B.2.). La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología sección B.5. y cálculo de muestra 6 )

Cuadro 39. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la segunda muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	Lignina Klason (% m/m)
1	1.761	1.16	0.2403	13.64
2	1.762	1.34	0.2540	14.42
3	1.762	1.25	0.2279	12.94
		Media		13.66
		Desviación estándar		0.7408

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 12.1%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología B.2.). La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología B.5. y cálculo de muestra 6 )

Cuadro 40. Determinación de la cantidad de lignina insoluble en ácido por método TAPPI-222 en la tercera muestra de raquis previamente triturado, prensado y seco.

Muestra	Masa inicial ±0.005g	Humedad final (%)	Masa final ±0.005g	Lignina Klason (% m/m)
1	1.728	4.03%	0.1482	8.58
2	1.728	5.23%	0.2531	14.6
3	1.728	3.68%	0.2692	15.6
	Media			12.9
	Desviación estándar			3.801

El resultado final está expresado en base seca de raquis de banano. La masa inicial de muestra se corrigió con una humedad con base húmeda de 13.58%, esta se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS, así como la humedad final con base húmeda de las muestras (ver metodología sección B.2.). La cantidad de lignina se obtuvo por la desintegración de raquis libre de extraíbles (ver metodología sección B.5. y cálculo de muestra 6)

## 2. Evaluación de proceso de deslignificación por cocción alcalina con NaOH.

Cuadro 41. Rendimiento de pulpa en el proceso de deslignificación por cocción alcalina de raquis de banano previamente triturado y seco

Razón de NaOH g/100g pulpa	Tiempo de cocción (min)	Pulpa inicial ±0.005g	Licor residual ±0.005 L	Pulpa final ±0.005g	Rendimiento %
8%	100	100	1.33	55.93	55.93 ± 0.010
8%	130	100	1.36	49.02	49.02 ± 0.011
8%	150	100	1.46	41.54	41.54 ± 0.013
10%	100	100	1.20	37.42	37.42 ± 0.008
10%	130	150	2.50	65.09	43.40 ± 0.014
10%	150	100	1.41	37.34	37.34 ± 0.001
12%	130	100	1.50	41.24	41.24 ± 0.012
14%	130	100	1.00	38.79	29.84 ± 0.014

El licor residual obtenido se determinó utilizando una probeta de 100 mL al finalizar la cocción, previo al lavado de la pulpa deslignificada (ver metodología sección C y cálculos de muestra 7, 8 y 9). La cantidad de pulpa final es libre de humedad, por lo que el rendimiento final es respecto a una base seca de pulpa.

### 3. Evaluación de pulpa celulósica obtenida de proceso de deslignificación.

Cuadro 42. Obtención de consistencia de pulpa de raquis de banano previamente triturado y prensado después de deslignificación con NaOH.

Razón g NaOH/100g pulpa	Tiempo de cocción (min)	Masa de pulpa total $\pm 0.005g$	Humedad final (%)	Masa de pulpa seca $\pm 0.005g$	Consistencia de muestreo (% m/m)	Consistencia de pulpa total (% m/m)
8%	100	1340	3.58	8.774	$1.87 \pm 0.104$	$28.03 \pm 1.60$
8%	130	1240	4.14	5.656	$1.49 \pm 0.131$	$22.33 \pm 1.97$
8%	150	1220	3.73	7.028	$1.95 \pm 0.139$	$25.05 \pm 1.78$
10%	100	417.5	6.37	4.026	$1.46 \pm 0.181$	$34.22 \pm 4.24$
10%	130	500.8	9.23	5.416	$1.41 \pm 0.130$	$36.38 \pm 3.35$
10%	150	1280	3.70	5.971	$1.42 \pm 0.119$	$25.72 \pm 2.16$
12%	130	567.5	3.59	6.074	$1.43 \pm 0.117$	$22.59 \pm 1.85$
14%	130	435.4	7.57	4.067	$1.39 \pm 0.170$	$23.97 \pm 2.95$

La masa de pulpa totales referente a una muestra tomada del total de pulpa diluida en agua según el método Tappi T-240 (ver metodología sección D.1.). La humedad final con base húmeda de la muestra se determinó utilizando una termobalanza marca OHAUS (ver metodología sección B.2.) y se sustrajo de la muestra final. La consistencia final indica la concentración final de pulpa suspendida (ver metodología D.1. y cálculo de muestra 10).

Cuadro 43. Número kappa determinado por espectrofotometría de la pulpa de raquis de banano seca previamente deslignificada por cocción alcalina.

Carga de NaOH	Tiempo (min)	Masa $\pm 0.005g$	0 min A	0 min B	0 min C	10 min A	10 min B	10 min C	NK A	NK B	NK C	Media	Desviación Estándar
0	0	0.100	0.624	0.538	0.527	0.0755	0.0773	0.0786	46.84	46.77	46.71	46.77	0.0648
8	60	0.119	0.715	0.701	0.692	0.0139	0.0131	0.0140	41.53	41.56	41.53	41.54	0.0173
8	100	0.144	0.743	0.731	0.724	0.0242	0.0237	0.0257	34.02	34.04	33.98	34.01	0.0301
8	130	0.135	0.761	0.725	0.718	0.0409	0.0317	0.0306	35.78	36.06	36.09	35.98	0.1746
8	150	0.114	0.869	0.857	0.850	0.0429	0.0375	0.0367	42.27	42.46	42.49	42.41	0.1232
10	100	0.122	1.465	1.450	1.434	0.1738	0.1620	0.1444	35.05	35.45	36.05	35.52	0.5053
10	130	0.111	1.653	1.666	1.663	0.4443	0.4180	0.3941	28.37	29.35	30.25	29.32	0.9426
10	150	0.114	1.524	1.505	1.479	0.1500	0.1331	0.1089	38.28	38.89	39.78	38.98	0.7531
12	100	0.132	0.642	0.620	0.605	0.0360	0.0405	0.0362	36.73	36.58	36.72	36.68	0.0802
12	130	0.118	1.356	1.340	1.329	0.0919	0.0863	0.0809	39.17	39.37	39.56	39.37	0.1945
14	130	0.112	0.798	0.787	0.747	0.0745	0.0735	0.0621	41.84	41.88	42.30	41.81	0.2561

La masa de pulpa es la cantidad de pulpa de raquis de banano deslignificada y seca ingresada a la reacción de oxidación con permanganato de potasio (ver metodología sección D.2.) Se realizó un triplicado de la lectura para la misma muestra a los 0 minutos y 10 minutos de la reacción, ya que según el método estandarizado la oxidación estará completa al terminar los 10 minutos de reacción (ver metodología D.2. y cálculo de muestra 12).

#### 4. Evaluación de cinética de reacción de deslignificación por cocción alcalina.

Cuadro 44. Valor de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación determinadas por lenguaje PYTHON.

Razón g NaOH/100g pulpa	Constante k1	Constante k2	Constante n1	Constante n2	% de error
8	-3.7	5.9	0.2	0.6	3.8047
10	-5.0	4.9	0.9	0.9	2.3254
12	-7.2	2.6	0.1	0.8	1.8138

Los valores de las constantes pertenecen al modelo general descrito en la ecuación 13 del marco teórico.

Cuadro 45. Número kappa obtenido para cada tiempo de deslignificación según modelo cinético.

Carga de NaOH (%)	Tiempo (min)	Valor Teórico	Valor experimental	Error (%)
0	0	43.10	46.77	8.51
8	60	39.46	41.54	4.69
8	100	34.46	34.01	0.01
8	130	35.86	35.98	0.33
8	150	40.26	42.41	5.34
0	0	47.64	46.77	1.82
10	100	34.82	35.52	2.00
10	130	27.89	29.32	5.12
10	150	38.74	38.98	0.61
0	0	45.78	46.77	2.16
12	100	36.68	36.68	1.67
12	130	39.37	39.37	1.71

Los valores teóricos son los valores de  $C_A$  obtenidos utilizando el modelo cinético ajustado utilizando Google Colab. La carga de NaOH se refiere a los gramos de reactivo añadidos por cada 100 g de pulpa.

Figura 20. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH del 8% obtenido en Google Colab.

	Error	Params	Out
9	0.520846	[7.9, 6.800000000000001, 0.5, 0.7000000000000001]	[46.31769819899107, 41.43136214908258, 34.2158...

Los parámetros cinéticos para el modelo propuesto se encuentran en el siguiente orden:  $k_1, k_2, n_1, n_2$

Figura 21. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH del 10% obtenido en Google Colab.

	Error	Params	Out
2	2.325448	[5.0, 4.9, 0.8, 0.9]	[47.63882577859161, 34.823508521744884, 27.892...
7	21.686620	[1.9000000000000001, 5.4, 0.2, 0.5]	[32.830973343168475, 28.30476927701162, 25.507...

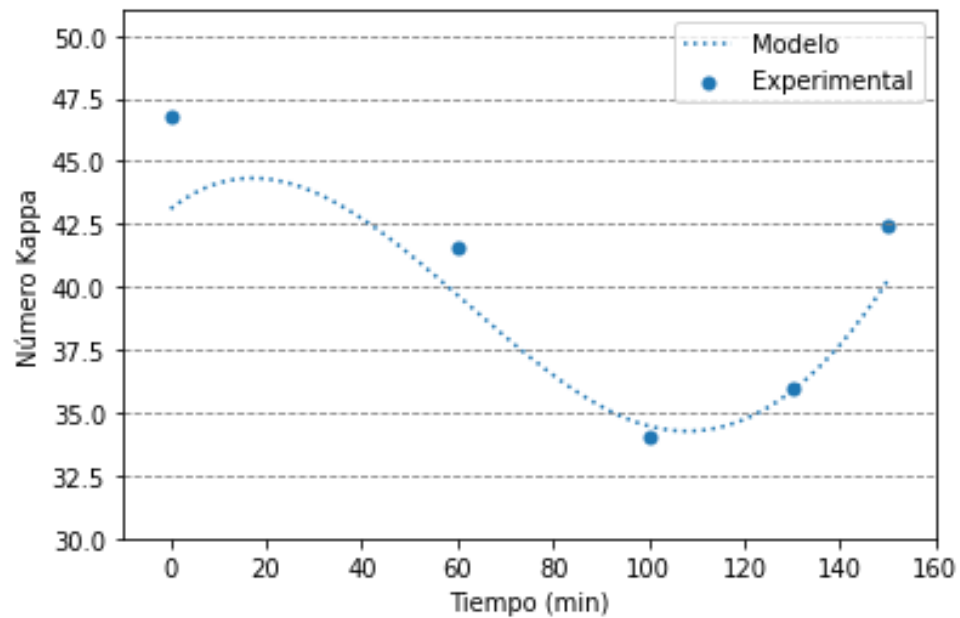
Los parámetros cinéticos para el modelo propuesto se encuentran en el siguiente orden:  $k_1, k_2, n_1, n_2$

Figura 22. Valores de constantes para modelo cinético de reacción de deslignificación por cocción alcalina a una carga de NaOH de 12% obtenido en Google Colab

	Error	Params	Out
1	1.813770	[7.2, 2.6, 0.1, 0.8]	[45.78268701394592, 36.073959842407675, 38.707...

Los parámetros cinéticos para el modelo propuesto se encuentran en el siguiente orden:  $k_1, k_2, n_1, n_2$

Figura 23. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 8% obtenido con Google Colab.



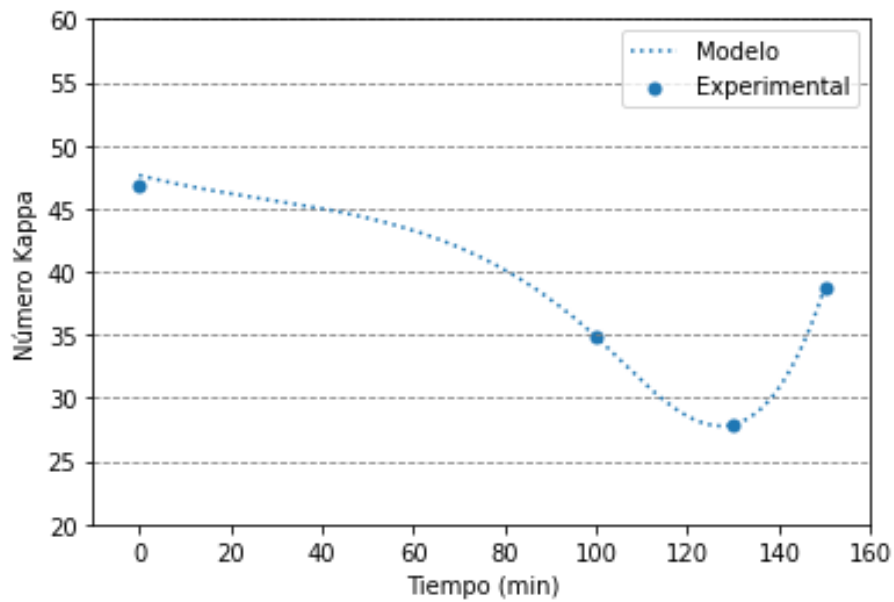
En la Figura 21 se muestran los números kappa obtenidos a 60, 100, 130 y 150 minutos de deslignificación, así como el ajuste del modelo matemático de  $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$  utilizando la herramienta de programación Google Colab y lenguaje Python, de donde se obtuvieron los valores para las constantes. La ecuación describe el comportamiento de la reacción de deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio. Se obtuvo un error del 0.52 para el ajuste del modelo.

Código:

Puntos: Número Kappa durante experimento realizado a pequeña escala para la deslignificación de raquis de banano con 8 g de Hidróxido de sodio por 100 g de pulpa.

Curva celeste: Grado de deslignificación predicho por modelo matemático para los valores experimentales representados por puntos.

Figura 24. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 10% obtenido con Google Colab.



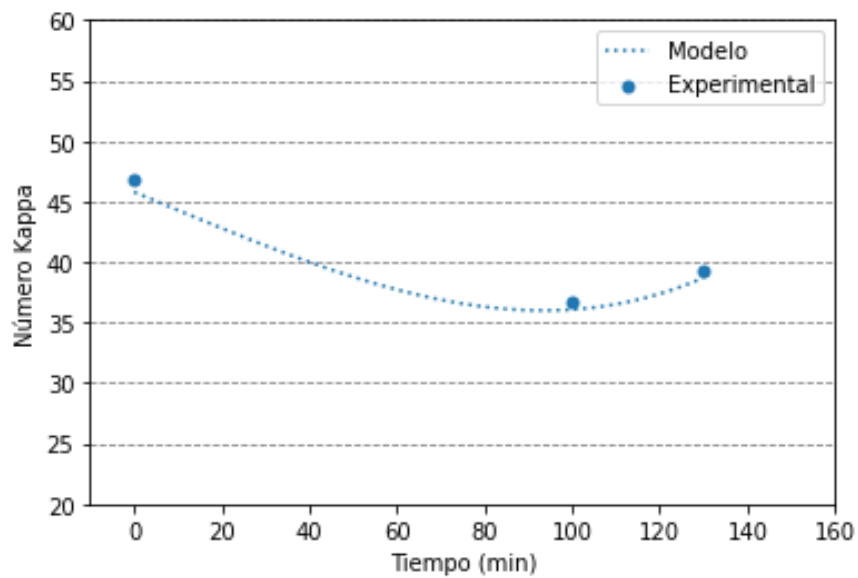
En la Figura 21 se muestran los números kappa obtenidos a 0, 100, 130 y 150 minutos de deslignificación, así como el ajuste del modelo matemático de  $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$  utilizando la herramienta de programación Google Colab y lenguaje Python, de donde se obtuvieron los valores para las constantes. La ecuación describe el comportamiento de la reacción de deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio. Se obtuvo un error del 2.33 para el ajuste del modelo.

Código:

Puntos: Número Kappa durante experimento realizado a pequeña escala para la deslignificación de raquis de banano con 10 g de Hidróxido de sodio por 100 g de pulpa.

Curva celeste: Grado de deslignificación predicho por modelo matemático para los valores experimentales representados por puntos.

Figura 25. Ajuste de modelo matemático a los datos experimentales del número kappa de lignina final en pulpa deslignificada a una carga alcalina del 12% obtenido con Google Colab.



En la Figura 21 se muestran los números kappa obtenidos a 0, 100 y 130 minutos de deslignificación, así como el ajuste del modelo matemático de  $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A^{n1} + k_2 C_A^{n2}$  utilizando la herramienta de programación Google Colab y lenguaje Python, de donde se obtuvieron los valores para las constantes. La ecuación describe el comportamiento de la reacción de deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio. Se obtuvo un error del 1.81 para el ajuste del modelo.

Código:

Puntos: Número Kappa durante experimento realizado a pequeña escala para la deslignificación de raquis de banano con 12 g de Hidróxido de sodio por 100 g de pulpa.

Curva celeste: Grado de deslignificación predicho por modelo matemático para los valores experimentales representados por puntos.

## 5. Balance de masa y energía del proceso

Cuadro 46. Determinación de cantidad de hidróxido de sodio consumido durante reacción de deslignificación.

Prueba	Volumen de HCl consumido ( $\pm 0.05$ mL)	Moles de NaOH en 10 mL	Concentración NaOH del Licor (N)	Moles de NaOH en licor	Masa de NaOH en licor (g)
1	9.3	0.0012	0.1163	0.2674	10.694
2	10.7	0.0013	0.1338	0.3076	12.304
3	10.2	0.0013	0.1275	0.2933	11.729
		Media	0.1258	0.2894	11.576
		Desviación Estándar	0.0089	0.0204	0.8158

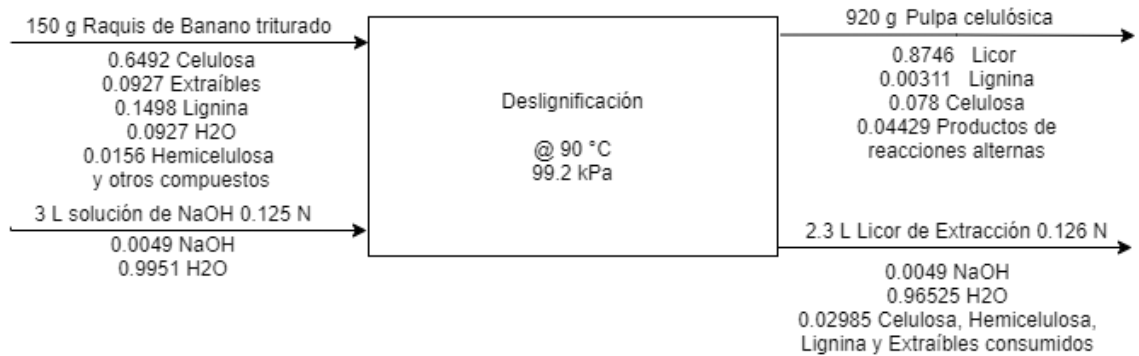
La cantidad de hidróxido de sodio se determinó para el balance de masa y energía por valoración del licor de cocción resultante con una solución de HCl 0.125 N.

Cuadro 47. Balance de masa del sistema de deslignificación de 150 g raquis de banano durante 130 minutos.

	Entrada (g)	Consumo (g)	Salida (g)
Lignina	22.47	19.606	2.862
Celulosa	97.38	25.148	72.232
Extraíbles	13.905	---	13.905
Hidróxido de sodio	15	3.424	11.576
Agua	3000	---	3000

La cantidad de lignina y celulosa se determinaron para la base seca de pulpa obtenida al final de la deslignificación.

Figura 26. Diagrama de balance de masa para deslignificación de 150 g de raquis de banano durante 130 minutos a escala laboratorio



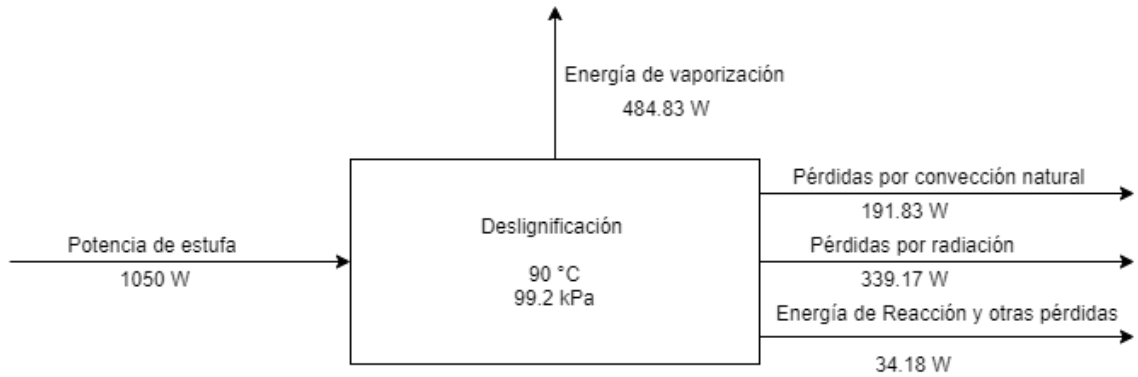
Las cantidades están expresadas en fracciones másicas de cada componente. Los resultados del balance de masa para este diagrama se encuentran en el Cuadro 47.

Cuadro 48. Balance de energía del sistema de deslignificación de raquis de banano.

	Entrada (W)	Salida (W)
Energía de cocción	1050	---
Pérdidas por convección	---	191.83
Pérdidas por radiación	---	339.17
Energía de evaporación	---	484.83
Energía de reacción	---	34.18

Los cálculos de cada energía en el balance se encuentra descrito en la sección de cálculos 14 al 23.

Figura 27. Diagrama de balance de energía para deslignificación de raquis de banano a escala laboratorio



Los datos para este balance se encuentran en el Cuadro 48. Para el balance de energía del proceso de deslignificación se tomó como sistema específico la olla de acero vitrificado, siendo las fronteras del sistema las paredes del recipiente y los alrededores el ambiente del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, a condiciones de presión de 99.2 kPa y 25.5 °C de temperatura ambiente. Para las pérdidas por convección natural se aproximó sistema a dos placas verticales paralelas y para las pérdidas por radiación del sistema se encontró el valor teórico para la emisividad del acero vitrificado, para mayor referencia revisar cálculos 14 al 23.

## 6. Análisis de costos

Cuadro 49. Evaluación de costos de electricidad durante proceso de deslignificación

Tiempos (min)	Consumo eléctrico (kWh)	Total
100	5.50	Q 4.94
130	6.25	Q 5.61
150	6.75	Q 6.06

Se determinó el costo de la energía consumida durante cada proceso de deslignificación tomando en cuenta que la tarifa de consumo para media tensión con demanda en punta (MTDp) para Guatemala es de 0.897277 Q/kWh y que el consumo eléctrico de la estufa es de 1.5 kWh por hornilla.

Cuadro 50. Evaluación de costos de consumo de hidróxido de sodio durante cocción alcalina de 150 g de raquis previamente triturado y prensado

Carga de NaOH (%)	Consumo de Hidróxido de Sodio (g)	Costo total	
8	12	Q	4.14
10	15	Q	5.18
12	18	Q	6.21
14	21	Q	7.25

Los costos de hidróxido de sodio para cada cocción alcalina se determinó con los precio de 1 kg del reactivo según Merck en Guatemala. (Merck Millipore, 2021)

Cuadro 51. Evaluación de costo de agua consumida durante cocción alcalina de 150 g de raquis previamente triturado y prensado.

Consumo	Cantidad (L)	Costo	
Agua para solución de hidróxido de sodio	3	Q	0.01
Agua de calentamiento	6	Q	0.02
Total		Q	0.02

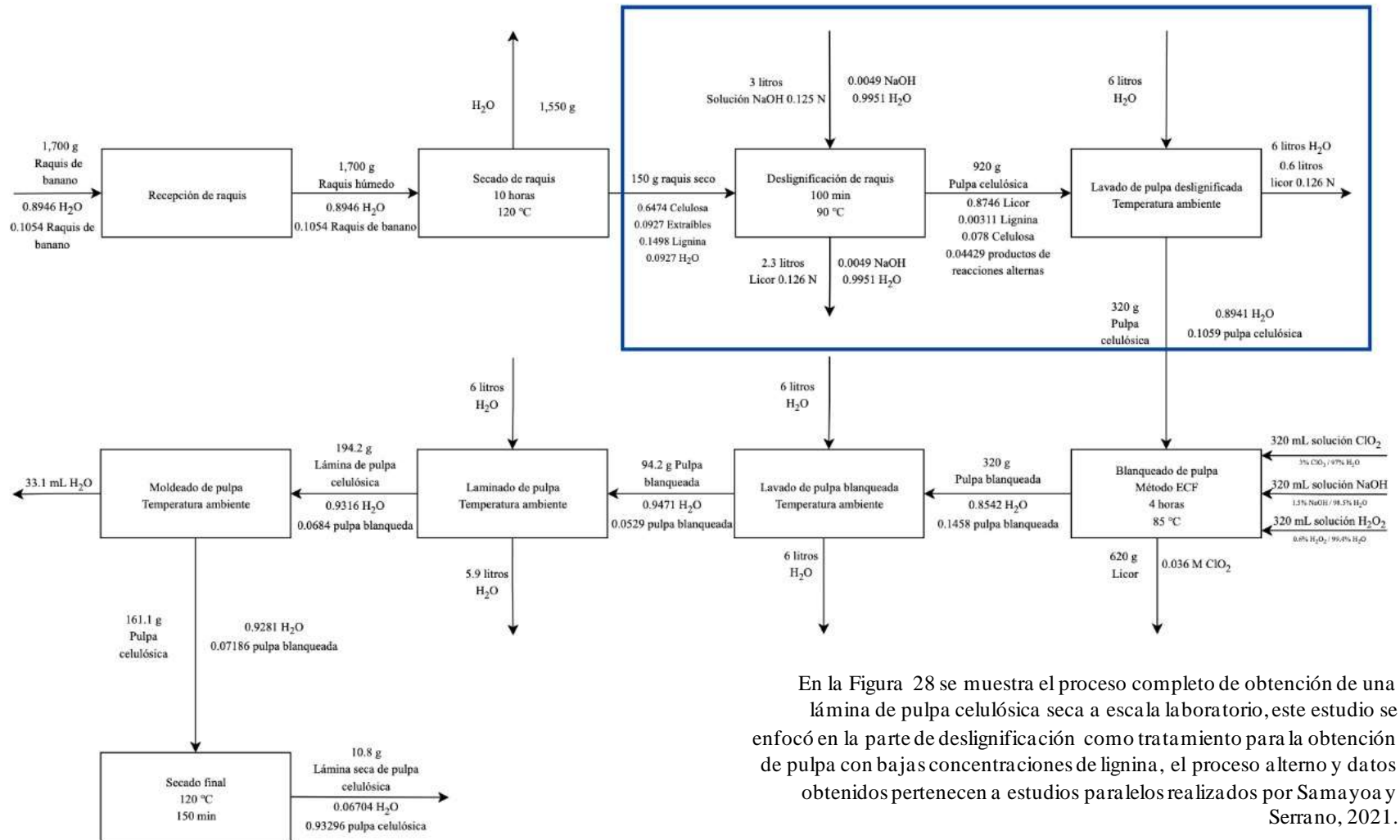
El costo de agua consumida durante la cocción alcalina se determinó tomando en cuenta el agua utilizada para la desintegración de la pulpa y el agua de calentamiento externa. Se tomó en cuenta el costo de agua de alcantarillado público establecido por la Municipalidad de Guatemala.

Cuadro 52. Costo total de producción de pulpa celulósica por desintegración alcalina de 150 g de raquis de banano a diferentes tiempos de cocción y carga de hidróxido de sodio.

Carga de NaOH (%)	Tiempo de Cocción	Costo Total
8	100	Q 9.86
	130	Q 10.53
	150	Q 10.98
10	100	Q 10.90
	130	Q 11.57
	150	Q 12.02
12	100	Q 11.93
	130	Q 12.60
	150	Q 13.05
14	100	Q 12.97
	130	Q 13.64
	150	Q 14.09

En el costo total de la cocción se tomó en cuenta el agua de consumo, la energía eléctrica de la estufa por hornilla utilizada, la cantidad de hidróxido de sodio utilizado en solución y se agregó el costo de las bolsas plásticas utilizadas durante cada cocción, el cuáles equivalente a Q. 0.76.

Figura 28. Diagrama de proceso completo de deslignificación de 1 700 g de raquis de banana para elaboración de láminas secas de pulpa celulósica.



En la Figura 28 se muestra el proceso completo de obtención de una lámina de pulpa celulósica seca a escala laboratorio, este estudio se enfocó en la parte de deslignificación como tratamiento para la obtención de pulpa con bajas concentraciones de lignina, el proceso alterno y datos obtenidos pertenecen a estudios para ellos realizados por Samayo y Serrano, 2021.

## E. Datos de placa y reactivos

Cuadro 53. Referencia técnica de secador industrial en laboratorio de operaciones unitarias

Característica	Valor
Marca	Corbett industries inc.
Serie	12805
Voltaje	220/3/60
Modelo	EC-404-6
Amperaje	120.2
Potencia de Motor (HP)	1.0

En el Cuadro 53 se muestran los datos de placa utilizados en el secador industrial, este equipo se implementó para el secado de raquis triturado, tanto prensado como sin prensar previo a la evaluación de las características lignocelulósicas y a la cocción con hidróxido de sodio. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 54. Referencia técnica de balanza analítica en laboratorio de operaciones unitarias

Característica	Valor
Marca	Precisa
Serie	01-00108085-1
Rango (g)	0.01-110
Incertidumbre	± 0.005 g
Modelo	XB 320M
Voltaje (V)	8-14.5

En el Cuadro 54 se muestran datos de la balanza analítica utilizada en todos los procedimientos para la determinación de las características lignocelulósicas de raquis de banano y la evaluación de la pulpa resultante de proceso de deslignificación a escala laboratorio. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 55. Referencia técnica de balanza industrial

Característica	Valor
Marca	OHAUS
Serie	00205506DN
Rango (g)	0.01-320
Incertidumbre	± 0.005 g
Modelo	T31P

En el Cuadro 55 se muestran los datos de placa para la balanza industrial utilizada en la determinación de la masa de materiales de más de 20 g, esta se utilizó durante todo el proceso del estudio, principalmente para el proceso de deslignificación. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 56. Referencia técnica de termobalanza utilizada para determinación de humedad con base húmeda en muestras.

Característica	Valor
Marca	OHAUS
Serie	B605071576
Modelo	MB 120
Máximo (g)	120
Incertidumbre	± 0.005 g
Voltaje (V)	100-120

Este equipo se utilizó para la determinación de la humedad con base húmeda de todas las muestras durante la evaluación de características previo a proceso de deslignificación, durante cocción alcalina y durante la determinación de propiedades de pulpa celulósica final. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 57. Referencia técnica de horno utilizado durante cocción alcalina con NaOH.

Característica	Valor
Marca	OVIEDO
Serie	E000734015000041126
Rango (°C)	0 – 270
Voltaje (V)	220
Potencia de horno (watt)	2000

Este equipo se utilizó como fuente de energía durante cocción alcalina con hidróxido de sodio, también para el secado de muestras menores a 50 g durante todo el estudio a escala laboratorio. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 58. Referencia técnica de espectrofotómetro utilizado para análisis de Número Kappa

Característica	Valor
Marca	Perkin Elmer
Modelo	Lambda 35
Serie	101N2011603
Incertidumbre	±0.11 nm

Este equipo se utilizó para las lecturas de absorbancia de permanganato de potasio durante reacción de oxidación con lignina residual en pulpa celulósica de raquis de banano. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones del laboratorio Global Quality de Guatemala.

Cuadro 59. Datos técnicos de Etanol utilizado en Extracción Soxhlet

Característica	Valor
Marca	EMSURE MERCK
Número de CAS	64-17-5
Grado	ACS reagent
Ensayo	>99.9% (GC)
Estado	Líquido
Lote	K47920983 623

Este reactivo se utilizó en todas las corridas para la evaluación de extraíbles por medio de un sistema de extracción Soxhlet Etanol:Tolueno. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 60. Datos técnicos de Tolueno utilizado en Extracción Soxhlet

Característica	Valor
Marca	Merck
Número de CAS	108-88-3
Nivel de calidad	300
Grado	ACS reagent
Ensayo %	>99.9
Estado	Líquido
Lote	K42419225

Este reactivo se utilizó en todas las corridas para la evaluación de extraíbles por medio de un sistema de extracción Soxhlet Etanol:Tolueno. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 61. Datos técnicos de Hidróxido de Sodio utilizado en cocción alcalina

Característica	Valor
Marca	Indumat Guatemala
Ensayo %	>99
Estado	Sólido
Lote	CI-31280.06.20

Este reactivo se utilizó durante cada una de las corridas de cocción de raquis de banano para deslignificación y obtención de pulpa celulósica, así como para la determinación de  $\alpha$ -celulosa en el residuo previo a cocción alcalina. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 62. Datos técnicos de Permanganato de Potasio utilizado en análisis de número Kappa

Característica	Valor
Marca	Merck
Número de CAS	7722-64-7
Ensayo %	>99
Estado	Sólido

Este reactivo se utilizó como agente oxidante durante evaluación de número kappa por espectrofotometría de raquis de banano después de proceso de deslignificación. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 63. Datos técnicos de Ácido acético utilizado en método de cuantificación de  $\alpha$ -celulosa

Característica	Valor
Marca	Merck
Número de CAS	64-19-7
Nivel de calidad	300
Ensayo %	>99.8
Estado	Líquido
Lote	K38452963 807

Este reactivo se utilizó durante los lavados en la evaluación de  $\alpha$ -celulosa en raquis de banano previo a proceso de deslignificación. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 64. Vernier para determinación de propiedades geométricas

Característica	Valor
Marca	Stanley Black and Decker
Modelo	1-35-603
Incertidumbre	$\pm 0.005$ cm

Este instrumento se utilizó para la medición de todas las dimensiones geométricas del raquis de banano sin triturar y triturado.

Cuadro 65. Manta de calentamiento para extracción Soxhlet

Característica	Valor
Marca	Electrothermal TM
Modelo	EMV
Voltaje	230 V
Capacidad	10 – 5 000 mL
Temperatura máxima	450 °C

Esta manta de calentamiento se utilizó para el sistema de extracción Soxhlet Etanol:Tolueno, se operó al rango de temperatura de ebullición de la solución. El equipo se utilizó dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 66. Datos técnicos de Ácido sulfúrico

Característica	Valor
Marca	Merck
Número de CAS	7664-93-9
Nivel de calidad	MQ 300
Ensayo %	95 – 95 %
Estado	Líquido

Este reactivo se utilizó durante la desintegración de la fibra para la evaluación de la cantidad de lignina en el raquis de banano previo a la cocción alcalina. Además, se utilizó como medio ácido durante la reacción de oxidación en la determinación del número kappa. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro 67. Datos técnicos de Ácido clorhídrico utilizado en determinación de hidróxido de sodio residual en licor de deslignificación.

Característica	Valor
Marca	Merck
Número de CAS	7647-01-0
Nivel de calidad	MQ 300
Lote	K39050017
Ensayo %	37 %
Estado	Líquido

Se utilizó ácido clorhídrico durante las valoraciones del licor negro obtenido de la cocción alcalina con hidróxido de sodio. Este se utilizó en una solución 0.125 N. Este reactivo se utilizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.

## F. Registro visual

Figura 29. Almacenamiento de raquis de banano previo a trituración.



Figura 30. Raquis de banano triturado y prensado en bandejas para ingreso a secador industrial.



Figura 31. Trozos de raquis de banano triturado y sin prensar entregado por bananera



Figura 32. Trozos de raquis de banano triturado y prensado entregado por bananera



Figura 33. Trozos de raquis de banana triturado, prensado y seco.



Figura 34. Sistema de extracción Soxhlet Etanol Tolueno



Figura 35. Desintegración de raquis de banana con Hidróxido de Sodio para determinación de  $\alpha$ -celulosa



Figura 36. Desintegración de pulpa con ácido sulfúrico para determinación de porcentaje de Lignina Klason según método TAPPI-T222



Figura 37. Pulpa previo a proceso de deslignificación



Figura 38. Pulpa resultante del proceso de cocción alcalina con Hidróxido de Sodio



Figura 39. Licor de cocción obtenido después de proceso de deslignificación de pulpa



Figura 40. Pulpa seca después de proceso de deslignificación de raquis de banano



Figura 41. Fibra de raquis de banana analizadas en microscopio después de proceso de deslignificación.

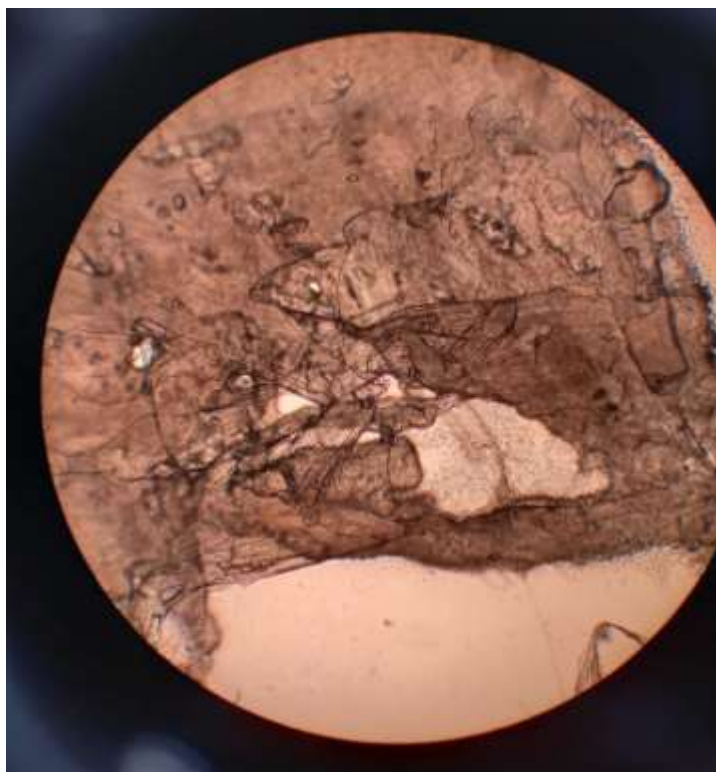


Figura 42. Espectrómetro utilizado durante determinación de número Kappa de deslignificación



Figura 43. Solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico previo a oxidación para determinación de método Kappa.



Figura 44. Resultado de reacción de oxidación de lignina con permanganato de potasio en medio ácido

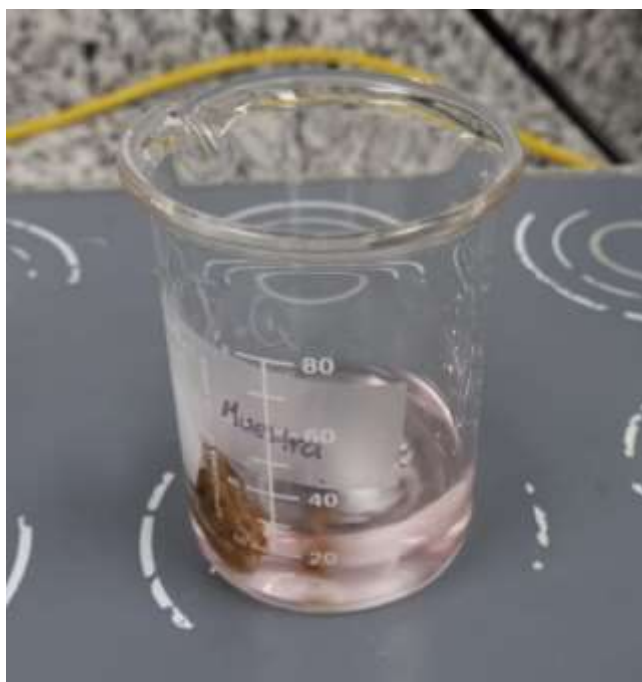


Figura 45. Determinación de pH de caldo de cocción obtenido del proceso de deslignificación



Figura 46. Método estandarizado Tappi – T240 de consistencia de pulpa

## **T 240 om-93**

OFFICIAL TEST METHOD – 1981  
REVISED – 1988  
REVISED – 1993  
© 1993 TAPPI

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability or responsibility under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

# **Consistency (concentration) of pulp suspensions**

## **1. Scope**

- 1.1 This method describes the measurement of pulp consistency (concentration) of pulp-water mixtures.
- 1.2 It is applicable to pulp-water mixtures containing up to 25% of oven-dry pulp.

## **2. Summary**

- 2.1 For pulp-water mixtures containing less than 1% of pulp, the excess water is removed by filtering and the resulting pulp pad is dried to constant weight.
- 2.2 For mixtures containing 1 to 25% pulp, the weighed material is diluted to 0.5% consistency or less, and the consistency of the stock is determined by removing the excess water by filtering and drying the pad to constant weight.

Figura 47. Método estandarizado para medición de número Kappa por valoraciones Tappi – T236

## **T 236 om-99**

TENTATIVE STANDARD - 1960

OFFICIAL STANDARD - 1976

CLASSICAL METHOD - 1985

CORRECTION - 1993

OFFICIAL METHOD -1999

©1999 TAPPI

The information and data contained in this document were prepared by a technical committee of the Association. The committee and the Association assume no liability or responsibility in connection with the use of such information or data, including but not limited to any liability under patent, copyright, or trade secret laws. The user is responsible for determining that this document is the most recent edition published.

### **CAUTION:**

This method may require the use, disposal, or both, of chemicals which may present serious health hazards to humans. Procedures for the handling of such substances are set forth on Material Safety Data Sheets which must be developed by all manufacturers and importers of potentially hazardous chemicals and maintained by all distributors of potentially hazardous chemicals. Prior to the use of this test method, the user should determine whether any of the chemicals to be used or disposed of are potentially hazardous and, if so, must follow strictly the procedures specified by both the manufacturer, as well as local, state, and federal authorities for safe use and disposal of these chemicals.

## **Kappa number of pulp**

### **1. Scope and significance**

This method applies to the determination of the relative hardness, bleachability, or degree of delignification of pulp. It may be used for all types and grades of chemical and semichemical, unbleached and semibleached pulps obtained in yields under 60%. This method may also be used for pulps obtained in yields up to 70%, provided the pulp has been well screened. See also Additional Information 10.5.

### **2. Definition**

The *kappa number* is the volume (in milliliters) of 0.1N potassium permanganate solution consumed by one gram of moisture-free pulp under the conditions specified in this method. The results are corrected to 50% consumption of the permanganate added.

Figura 48. Método estandarizado Tappi-222 para cuantificación de Lignina insoluble en ácido

<b>TAPPI</b>	WI	060802.06
	T	222
	DRAFT NO.	2
	DATE	June 16, 2006
	WORKING GROUP CHAIRMAN	Method reaffirmed
	SUBJECT CATEGORY	Chemical Properties
RELATED METHODS	See "Additional Information"	

**CAUTION:**

This Test Method may include safety precautions which are believed to be appropriate at the time of publication of the method. The intent of these is to alert the user of the method to safety issues related to such use. The user is responsible for determining that the safety precautions are complete and are appropriate to their use of the method, and for ensuring that suitable safety practices have not changed since publication of the method. This method may require the use, disposal, or both, of chemicals which may present serious health hazards to humans. Procedures for the handling of such substances are set forth on Material Safety Data Sheets which must be developed by all manufacturers and importers of potentially hazardous chemicals and maintained by all distributors of potentially hazardous chemicals. Prior to the use of this method, the user must determine whether any of the chemicals to be used or disposed of are potentially hazardous and, if so, must follow strictly the procedures specified by both the manufacturer, as well as local, state, and federal authorities for safe use and disposal of these chemicals.

**Acid-insoluble lignin in wood and pulp  
(Reaffirmation of T 222 om-02)**