

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Comparación de métodos de decoloración en pulpa celulósica  
deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo  
ECF y TCF

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Lai-Wah Elisa María Serrano Quán  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala  
2022



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Comparación de métodos de decoloración en pulpa celulósica  
deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo  
ECF y TCF

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Lai-Wah Elisa María Serrano Quán  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química  
Industrial

Guatemala  
2022

Vo. Bo.:

(f)

Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

Tribunal Examinador:

(f)

Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc.

(f)

Ingeniero Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

(f)

Ingeniera Carmen Alicia Ortíz Pineda, M. Sc.

Guatemala, 13 de junio de 2022

## PREFACIO

Esta investigación comenzó con la participación en el desafío Hult Prize 2020 “Construyendo startups que tengan un impacto positivo en nuestro planeta con cada dólar ganado”, donde se desarrolló un proyecto para la elaboración de embalaje y cartón a partir de los residuos vegetales de los mercados locales, entre ellos, residuos de plátano.

A partir del proyecto desarrollado en la competencia, se decidió profundizar en el tratamiento químico y los procesos industriales que conlleva la elaboración de cartón. También, se buscó una fuente constante de materia prima en lugar de la variación de los residuos vegetales que provienen de los mercados. Por ello, se optó por los residuos de las plantaciones de banano, siendo el pinzote de mayor interés, mayor aplicación industrial y similitud con el plátano empleado en el proyecto anteriormente desarrollado.

El proceso industrial para la elaboración de cartón se dividió en tres subprocesos: deslignificación de pulpa, blanqueo de pulpa y secado de láminas. Esta investigación se enfoca en el tratamiento químico del blanqueo.

# CONTENIDO

PREFACIO .....	iii
CONTENIDO.....	iv
LISTA DE CUADROS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	2
A. General .....	2
B. Específicos .....	2
III. JUSTIFICACIÓN .....	3
IV. MARCO TEÓRICO .....	4
A. Fuentes de fibra para la fabricación de pulpa .....	4
B. Banano .....	4
1. Pinzote .....	5
2. Lignina.....	5
C. Blanqueo de pasta .....	5
1. ECF – Elemental Chlorine Free .....	6
2. TCF – Total Chlorine Free.....	6
D. Agentes blanqueadores.....	7
1. Hipoclorito de sodio.....	8
2. Dióxido de cloro .....	8
3. Hidróxido de sodio.....	8
4. Peróxido de hidrógeno .....	8
5. Silicato de sodio.....	8
6. Sulfato de magnesio.....	9
E. Número Kappa .....	9
F. Modelos de colores .....	10
1. Pantone ® .....	10
2. RGB .....	10
3. CMYK .....	11
4. CIELAB .....	12
G. COGUANOR NTG 29001 .....	13
V. ANTECEDENTES.....	15
VI. METODOLOGÍA .....	16

A.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	16
B.	Blanqueo ECF .....	17
1.	Etapa D <sub>0</sub> .....	17
2.	Etapa E <sub>p</sub> .....	17
3.	Etapa D <sub>1</sub> .....	17
C.	Blanqueo TCF .....	17
D.	Determinación de número Kappa .....	18
E.	Determinación de pH .....	18
1.	pH de pulpa .....	18
2.	pH de licor .....	18
F.	Determinación de densidad .....	18
G.	Determinación de contenido de humedad .....	18
H.	Determinación de color Pantone® .....	19
I.	Determinación de parámetros CIELAB .....	19
J.	Determinación de cloruros .....	19
K.	Determinación de sulfatos .....	19
1.	Preparación de crisoles .....	19
2.	Precipitación y digestión .....	19
3.	Filtración y lavado .....	20
4.	Calcinación .....	20
L.	Determinación de magnesio .....	20
1.	Volumetría de formación de complejos .....	20
M.	Determinación de sodio .....	20
N.	Análisis microscópico de fibras .....	21
O.	Secado de pinzote .....	21
VII.	RESULTADOS .....	22
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	24
IX.	CONCLUSIONES .....	27
X.	RECOMENDACIONES .....	28
XI.	BIBLIOGRAFÍA .....	29
XII.	ANEXOS .....	31
A.	Diagrama de bloques .....	31
B.	Balance de masa .....	37
C.	Datos de placa .....	43
D.	Datos originales .....	45
E.	Datos calculados .....	50
F.	Cálculo de muestra .....	56

G.	Análisis de error .....	59
J.	Imágenes adicionales.....	60
XIII.	GLOSARIO.....	73



## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Condiciones de operación de agentes blanqueadores .....	7
Cuadro 2. Características químicas del agua para consumo humano .....	14
Cuadro 3. Número Kappa promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	22
Cuadro 4. pH promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	22
Cuadro 5. pH promedio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF.....	22
Cuadro 6. pH promedio del licor de pulpa blanqueada con el método TCF.....	22
Cuadro 7. Densidad promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	22
Cuadro 8. Contenido de humedad promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	22
Cuadro 9. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	23
Cuadro 10. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB .....	23
Cuadro 11. Concentración de cloruros, sulfatos y magnesio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	23
Cuadro 12. Costo variable de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	23
Cuadro 13. Especificaciones de espectrofotómetro UV/VIS .....	43
Cuadro 14. Especificaciones de potenciómetro.....	43
Cuadro 15. Especificaciones de analizador de humedad.....	43
Cuadro 16. Especificaciones de densitómetro .....	43
Cuadro 17. Especificaciones de estufa convencional .....	43
Cuadro 18. Especificaciones de mufla .....	44
Cuadro 19. Especificaciones de horno para laboratorio .....	44
Cuadro 20. Especificaciones de microscopio .....	44
Cuadro 21. Especificaciones de balanza semianalítica.....	44
Cuadro 22. Especificaciones de balanza analítica .....	44
Cuadro 23. Especificaciones de balanza industrial.....	44
Cuadro 24. Masa de pulpa durante el blanqueo con el método ECF.....	45
Cuadro 25. Masa de pulpa durante el blanqueo con el método TCF.....	45
Cuadro 26. Absorbancia para determinar el número Kappa de pulpa blanqueada con el método ECF .....	45
Cuadro 27. Absorbancia para determinar el número Kappa de pulpa blanqueada con el método TCF .....	46
Cuadro 28. pH de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	46
Cuadro 29. pH del licor de pulpa blanqueada con el método ECF.....	46
Cuadro 30. pH del licor de pulpa blanqueada con el método TCF.....	46
Cuadro 31. Masa y volumen de etanol desplazado de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	47
Cuadro 32. Contenido de humedad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	47
Cuadro 33. Código Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	47
Cuadro 34. Parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB .....	48
Cuadro 35. Parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB .....	48
Cuadro 36. Masa de cloruro de potasio para estandarizar la solución de nitrato de plata para la determinación de cloruros.....	48
Cuadro 37. Volumen de la solución de nitrato de plata para la determinación de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF.....	49
Cuadro 38. Masa de crisoles para la determinación de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF .....	49
Cuadro 39. Volumen de la solución de ácido clorhídrico para la determinación de sodio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	49
Cuadro 40. Promedio del número Kappa de pulpa blanqueada con el método ECF .....	50
Cuadro 41. Promedio del número Kappa de pulpa blanqueada con el método TCF .....	50

Cuadro 42. Promedio del pH de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	51
Cuadro 43. Promedio del pH del licor de pulpa blanqueada con el método ECF .....	51
Cuadro 44. Promedio del pH del licor de pulpa blanqueada con el método TCF .....	51
Cuadro 45. Densidad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	51
Cuadro 46. Promedio del contenido de humedad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	52
Cuadro 47. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB .....	52
Cuadro 48. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB .....	53
Cuadro 49. Concentración de la solución estandarizada de nitrato de plata para la determinación de cloruros .....	53
Cuadro 50. Concentración de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF.....	54
Cuadro 51. Concentración de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF .....	54
Cuadro 52. Masa de sodio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF .....	54
Cuadro 53. Costo variable de reactivos y servicios para el blanqueo de 1 kg de pulpa con el método ECF.	55
Cuadro 54. Costo variable de reactivos y servicios para el blanqueo de 1 kg de pulpa con el método TCF.	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composición de una planta de banano .....	4
Figura 2. Modelo de color RGB .....	11
Figura 3. Modelo de color CMYK .....	12
Figura 4. Modelo de color CIELAB .....	13
Figura 5. Diagrama de bloques del blanqueo de pulpa deslignificada con el método ECF .....	31
Figura 6. Flujos de entrada y salida de la etapa $D_0$ del blanqueo con el método ECF.....	32
Figura 7. Flujos de entrada y salida del lavado 1 del blanqueo con el método ECF .....	32
Figura 8. Flujos de entrada y salida de la etapa $E_P$ del blanqueo con el método ECF.....	33
Figura 9. Flujos de entrada y salida del lavado 2 del blanqueo con el método ECF .....	33
Figura 10. Flujos de entrada y salida de la etapa $D_1$ del blanqueo con el método ECF.....	34
Figura 11. Flujos de entrada y salida del lavado 3 del blanqueo con el método ECF .....	34
Figura 12. Diagrama de bloques del blanqueo de pulpa deslignificada con el método TCF.....	35
Figura 13. Flujos de entrada y salida de la etapa P del blanqueo con el método TCF.....	35
Figura 14. Flujos de entrada y salida del lavado del blanqueo con el método TCF .....	36
Figura 15. Balance de masa del blanqueo de 100 g de pulpa deslignificada con el método ECF .....	37
Figura 16. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa $D_0$ del blanqueo con el método ECF .....	38
Figura 17. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 1 del blanqueo con el método ECF .....	38
Figura 18. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa $E_P$ del blanqueo con el método ECF .....	39
Figura 19. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 2 del blanqueo con el método ECF .....	39
Figura 20. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa $D_1$ del blanqueo con el método ECF .....	40
Figura 21. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 3 del blanqueo con el método ECF .....	40
Figura 22. Balance de masa del blanqueo de 100 g de pulpa deslignificada con el método TCF .....	41
Figura 23. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa P del blanqueo con el método TCF .....	41
Figura 24. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado del blanqueo con el método TCF .....	42
Figura 25. Muestra de pulpa deslignificada en solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico para determinar el número Kappa .....	60
Figura 26. Color Pantone® de pulpa deslignificada.....	61
Figura 27. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF .....	62
Figura 28. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método TCF .....	63
Figura 29. Coordenadas de color del modelo cromático RGB, HEX, CMYK y CIELAB de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	64
Figura 30. Valoración de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF.....	66
Figura 31. Calcinación de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF.....	68
Figura 32. Valoración de magnesio del licor de pulpa blanqueada con el método TCF .....	68
Figura 33. Fibras de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF.....	69
Figura 34. Pinzote de banano empleado para el blanqueo ECF y TCF .....	70
Figura 35. Pinzote de banano triturado.....	71
Figura 36. Torta de pinzote prensado con prensa hidráulica .....	71
Figura 37. Cartón de huevos elaborado con pulpa deslignificada y blanqueada con el método ECF y TCF 72	72

## RESUMEN

El presente trabajo expone la comparación de métodos de decoloración en pulpa celulósica deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo ECF (libre de cloro elemental, *Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) y blanqueo TCF (totalmente libre de cloro, *Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés). Para ello, se determinó el número Kappa, pH, densidad y humedad de la pulpa antes y después de cada método de blanqueo, se comparó la tonalidad de la pulpa decolorada contra una referencia estándar y se realizó un análisis del costo variable a escala laboratorio y las concentraciones de cloruros, sulfato y magnesio producidas por ambos métodos de blanqueo. Para la pulpa blanqueada por el método ECF y TCF, se obtuvo un número Kappa de 34.73 y 39.06, pH de 9.20 y 8.70, densidad de 0.978 y 0.936 g/mL, humedad de 88.38% y 87.93%, código Pantone® 468 U y 7499 U, y costo variable de Q23.12 (2.99 USD) y Q4.77 (0.62 USD) por kilogramo, respectivamente. Además, se obtuvo los parámetros de luminosidad de 77.25 y 80.37, valor rojo/verde de -0.04 y -0.46, valor azul/amarillo de 14.08 y 9.74, y reflectividad de 18.67% y 20.56% para la pulpa blanqueada por el método ECF y TCF, respectivamente. También, se obtuvo una concentración de 1598.20 mg/L de cloruros en el licor ECF y 301.54 mg/L de sulfatos en el licor TCF. No se percibieron cambios significativos de pH, densidad y humedad de la pulpa antes y después de cada método de decoloración, únicamente una diferencia en el número Kappa. Asimismo, el método de blanqueo TCF proporcionó una mejor tonalidad de pulpa que el método de blanqueo ECF. Además, ambos métodos de blanqueo no cumplieron con los límites máximos aceptables y permisibles establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001. Finalmente, se obtuvo que el método de blanqueo TCF es más económico que el método ECF.

# I. INTRODUCCIÓN

El banano se ha posicionado como el principal producto agrícola de exportación en Guatemala y la fruta con mayor representación en la región tropical a nivel mundial, con una producción global de 32 millones de toneladas métricas. Su fácil crecimiento, movimiento de exportación y alta demanda posiciona a esta industria en un lugar relevante en la economía nacional. Además, representa una fruta básica en la alimentación dado su precio económico, sabor, disponibilidad durante todo el año y valor nutricional. No obstante, se desechan grandes cantidades de residuos derivados de su cultivo, siendo 8 t/ha de pseudotallo, 4.7 t/ha de hojas y 0.7 t/ha de pinzote, también conocido como raquis, el cual soporta el conjunto de bananos. Dichos residuos de pinzote pueden emplearse como aditivos para el material compostable tan requerido en la industria agroquímica, así como materia prima para la producción de pulpa para la elaboración de cartón.

Las propiedades y características de la fibra obtenida de la planta de banano son adecuadas para producir una pulpa que cumpla los requisitos necesarios para la producción de papel o cartón, cuyo proceso parte de la deslignificación de la pulpa, pasando por el blanqueamiento de dicho material y culmina con el secado y prensado de las láminas.

El proceso de blanqueo consiste en aclarar y refinar la pulpa, pasando por varias etapas definidas por los agentes blanqueantes empleados. Este proceso puede estar basado en cloro, sin cloro elemental o totalmente libre de cloro. El método predominante solía ser el blanqueo basado en cloro; actualmente se emplean las alternativas sin cloro elemental y libres de cloro.

El blanqueo libre de cloro elemental, conocido como ECF (*Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) es el más empleado en la actualidad y utiliza dióxido de cloro en lugar del cloro tradicional. En cambio, el blanqueo totalmente libre de cloro, conocido como TCF (*Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) no utiliza ninguna sustancia relacionada con átomos de cloro. Estos métodos de blanqueo surgen como nuevas alternativas al blanqueo tradicional para una producción de pulpa y cartón más limpia y consiente con el medio ambiente al disminuir la cantidad de compuestos organoclorados formados en el proceso.

En la presente investigación, se compara el uso de ambos métodos de blanqueo en pulpa deslignificada, considerando las características físicas de la pulpa como el número Kappa y pH, y también la cantidad de emisiones del agua residual del proceso, así como la metodología para llevar a cabo el blanqueo ECF y TCF.

## II. OBJETIVOS

### A. GENERAL

Comparar métodos de decoloración en pulpa celulósica deslignificada de pinzote de banano empleando blanqueo ECF y TCF para fabricación de cartón.

### B. ESPECÍFICOS

1. Determinar el número Kappa, pH, densidad y humedad de la pulpa celulósica deslignificada, de pinzote de banano, antes y después de la decoloración, para comparar los cambios físicos obtenidos por el blanqueo ECF y TCF.
2. Comparar la tonalidad de la pulpa decolorada por el blanqueo ECF con dióxido de cloro ( $D_0E_P D_1$ ) y TCF con peróxido de hidrógeno (P), para elegir el método que proporcione el color más cercano a una referencia estándar.
3. Comparar costos variables a escala laboratorio y las concentraciones de cloruros, sulfatos y magnesio obtenidas del licor de cada método de blanqueo para seleccionar el de menor costo y menor impacto ambiental.

### III. JUSTIFICACIÓN

La industria papelera está aumentando continuamente. En el año 2017, la producción de papel y cartón fue aproximadamente de 420 millones de toneladas métricas a nivel mundial. Además, la principal fuente de fibra para su elaboración es la madera procedente de bosques de coníferas, aunque también se ha extendido a bosques tropicales y boreales. La alta demanda de pulpa blanqueada para la producción de cartón implica un gran consumo de madera. Por ello, se buscan alternativas de fibra más ecológicamente justificables que la madera, como puede ser el caso de los residuos de planta de banano, principalmente el pinzote.

La producción mundial de banano alcanza las 32 millones de toneladas métricas y es uno de los cultivos agrícolas más importantes debido a su bajo precio, disponibilidad y valor nutritivo. En Guatemala, se registró una producción de aproximadamente 26 millones de quintales en el año 2019. Este fruto se ha posicionado como el principal producto agrícola de exportación en el país, exportando 24 millones de quintales de banano ese año y desechando grandes cantidades de residuos derivados de su cultivo, como lo es el pseudotallo, hojas y pinzote.

Por ello, es necesario un estudio que contribuya al aprovechamiento de dichos residuos, específicamente el pinzote, siendo una posibilidad el emplearlos como una nueva materia prima en la industria papelera. No obstante, la producción de cartón requiere fibras con altos grados de blancura, lo cual implica etapas sucesivas de blanqueo con químicos que contienen cloro o hipoclorito de sodio. Estos químicos producen cloroformo y compuestos organoclorados, conocidos como contaminantes orgánicos persistentes debido a su propiedad de bioacumulación, contribuyendo a una mayor toxicidad en los efluentes. Por ello, ha aumentado la necesidad de emplear métodos de blanqueo libres de cloro elemental (ECF) o totalmente libres de cloro (TCF) como nuevas alternativas al blanqueo tradicional para una producción de pulpa y cartón más limpia, disminuyendo significativamente la cantidad de compuestos organoclorados formados en la pulpa y el efluente del proceso en comparación con el blanqueo basado en el gas cloro.

En este estudio se evaluó la decoloración de una pulpa celulósica obtenida a partir del pinzote de banano, empleando un blanqueo ECF y TCF para seleccionar el más adecuado, económico y responsable con el ambiente para continuar con el proceso de fabricación de cartón, impulsando a la industria papelera a disminuir el uso de madera con el aprovechamiento de los residuos de las plantaciones bananeras.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. FUENTES DE FIBRA PARA LA FABRICACIÓN DE PULPA

La industria papelera requiere diversas fuentes de fibra para la fabricación de pulpa. La principal es la madera proveniente de diversas especies de coníferas y arbóreas, aunque también se recurre al uso de bagazo, bambú, paja de trigo y cortezas como una fuente secundaria (Keefe y Teschke, 1998).

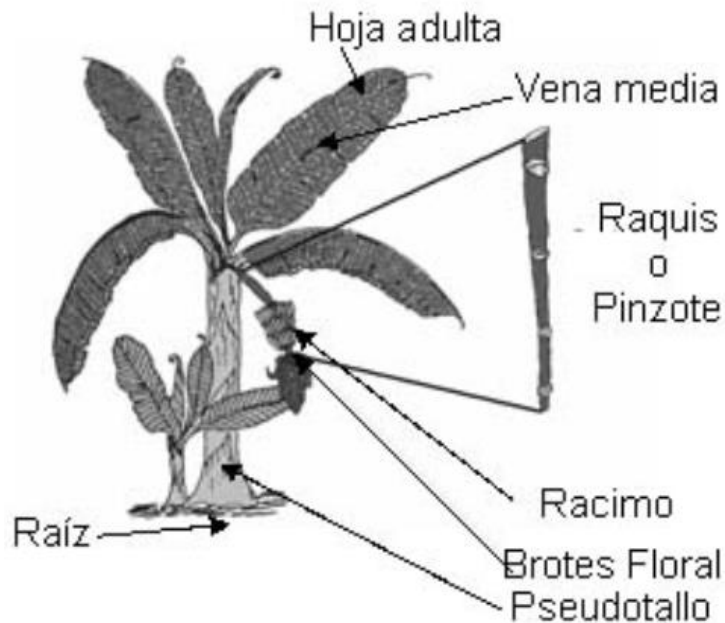
La composición de la pulpa o pasta es mayormente de fibra virgen. No obstante, el uso del papel reciclado como materia prima y la fabricación de este sigue aumentando, tanto por la facilidad para producirlo y ahorro energético asociado, como la elaboración de productos finales competitivos con la calidad del papel hecho con materia virgen (Jain, Urban, Balbach y Webb, 2012).

### B. BANANO

El banano es un fruto que se cultiva en las regiones tropicales, siendo el quinto alimento de mayor comercio en el mundo luego de los cereales, azúcar, café y cacao, con una producción mundial es de 32 millones de toneladas métricas. Representa una fruta básica en la alimentación dado su precio económico, sabor, disponibilidad durante todo el año, valor nutricional y fácil crecimiento (Turrado, Saudeco, Sanjuán y Sulbaran, 2009 & Martínez, Cayón y Ligarreto, 2016).

La planta de banano está compuesta por pseudotallo, pinzote o raquis, racimo, hojas y raíces (Turrado *et al.*, 2009).

Figura 1. Composición de una planta de banano



(Turrado *et al.*, 2009)



## 1. Pinzote

La producción agrícola es una de las fuentes principales de residuos agroindustriales; en el caso de la producción de banano, se tienen residuos orgánicos de la cosecha, selección y empaque del fruto. El mayor residuo es el pinzote, también llamado raquis, que es la fracción del tallo de la planta de banano que soporta el conjunto de bananos y está constituido por fibras lignocelulósicas con características semileñosas que pueden emplearse como materia prima para la obtención de celulosa para la fabricación de cartón (Turrado *et al.*, 2009).

## 2. Lignina

La lignina es un biopolímero abundante en las plantas que conforma la pared celular junto con la celulosa y hemicelulosa. Se considera como un recurso renovable asequible y de potencial uso industrial, con una producción anual de  $5.36 \times 10^8$  toneladas métricas. La recuperación de este polímero es una propuesta de interés industrial para el manejo de licor residual proveniente de la fabricación de pulpa. En el caso de la fabricación de cartón, la lignina otorga el color café oscuro de las fibras de la pulpa y continuará oscureciéndose con el tiempo si no se remueve (Chávez y Domine, 2013).

La remoción de la lignina y el blanqueo de las fibras brinda un mayor brillo y permite obtener un cartón más durable y estable (U.S. Congress, 1989).

## C. BLANQUEO DE PASTA

El blanqueo es un proceso por el cual se aclara y refina la pulpa, pasando por varias etapas definidas por el agente blanqueante, acidez, temperatura y duración. Es esencial en el proceso de producción de cartón y papel, ya que la pulpa presenta una calidad superior en brillo, suavidad y limpieza en comparación con la pulpa no blanqueada (Astrakianakis y Anderson, 1998 & Sharma, Bhardwaj y Singh, 2020).

El propósito es disolver o modificar la lignina residual del proceso de elaboración de la pulpa mediante un proceso mecánico o químico, sin alterar la integridad de las fibras (U.S. Congress, 1989). Entre cada etapa, se debe lavar la pasta con agentes cáusticos para disolver la lignina y eliminar los agentes de blanqueo. Al finalizar la secuencia, la pasta atraviesa diversos tamices y limpiadores para retirar cualquier contaminante. Con ello, se procede al almacenamiento de esta (Astrakianakis y Anderson, 1998).

Hay tres categorías principales de secuencias de blanqueo: basadas en cloro, sin cloro elemental y libres de cloro. Hasta 1990, el método predominante era el blanqueo basado en cloro, llevado a cabo a un bajo pH, removiendo los elementos que no forman parte del proceso de la pulpa (Hart, 2019).

## 1. ECF – Elemental Chlorine Free

Las secuencias de blanqueo libres de cloro elemental, conocidas como ECF (*Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) son comúnmente utilizadas para elaborar pulpa a partir de madera. Este método requiere de coordinación entre las etapas, brillo, flexibilidad y eficiencia de los lavados. Actualmente, es el método de blanqueo predominante en el mundo, el cual emplea dióxido de cloro, peróxidos y oxígeno como oxidantes, en lugar del cloro tradicional. Con ello, la cantidad de compuestos organoclorados formados en la pulpa y efluente disminuye significativamente en comparación con el blanqueo basado en cloro (Loureiro, Domingues, Evtuguin, Graça y Carvalho, 2010 & Hart, 2019).

La secuencia de blanqueo más utilizada es la CEDED, donde cada símbolo representa al agente blanqueador correspondiente. En este caso, cloro (C), hidróxido de sodio (E) y dióxido de cloro (D). Debido a la naturaleza de los compuestos organoclorados y la tendencia hacia la eliminación de su uso, el dióxido de cloro se suele sustituir por dióxido de azufre para detener la reacción de blanqueo y controlar la acidez de la pasta (Astrakianakis y Anderson, 1998).

El dióxido de cloro es un agente blanqueador selectivo que preserva la calidad de la pulpa en comparación con el blanqueo convencional. Sin embargo, en el proceso de blanqueo ECF, dos tercios del químico se agotan en reacciones secundarias improductivas. El dióxido de cloro reacciona con la pulpa, formando clorito, ácido hipocloroso y cloro molecular. El último vuelve a reaccionar con el dióxido de cloro, mientras el hipoclorito reacciona con el clorito para formar iones clorato. A su vez, el cloro molecular se descompone en iones cloruro. Tanto el clorito como el clorato no tienen ninguna función blanqueadora. Debido a la presencia de cloruros, no es posible recuperar los efluentes, sino que deben tratarse adecuadamente para su desecho (Sharma *et al.*, 2020).

## 2. TCF – Total Chlorine Free

Se han desarrollado secuencias de blanqueo totalmente libres de cloro, conocidas como TCF (*Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés). Estos métodos se desarrollaron como una respuesta ante las concentraciones de compuestos organoclorados todavía presentes en la pulpa y efluentes asociados a los métodos anteriormente descritos. El blanqueo TCF no utiliza ninguna sustancia relacionada con átomos de cloro. Algunas de ellas emplean agentes quelantes, enzimas, ozono, peróxido de hidrógeno y perácidos. Dada la eliminación de las fases ácidas de la secuencia tradicional, estas requieren un lavado ácido para remover los metales presentes en la celulosa. No obstante, la pulpa obtenida por este método no puede blanquearse con un alto nivel de brillo sin sacrificar el contenido de celulosa (Astrakianakis y Anderson, 1998; Hart, 2019 & Sharma *et al.*, 2020).

El blanqueo TCF reduce el volumen del efluente de manera eficaz debido al ciclo cerrado del proceso y consume una menor cantidad de agua, aunque puede presentar mayores niveles de DQO debido a la degradación del contenido de celulosa en la pulpa (Sharma *et al.*, 2020).

## D. AGENTES BLANQUEADORES

Los agentes blanqueadores y el orden en que se utilizan definen la secuencia de blanqueo. Generalmente, cada secuencia consta de varias fases, incluyendo una fase de deslignificación y otra de brillo. Cada uno de los químicos blanqueadores tienen una letra capital asignada, que se utilizan para definir una variedad de secuencias de blanqueo de manera uniforme. De igual manera, se pueden denotar las operaciones genéricas de adición de químicos, mezcla en la pulpa, tiempo de retención y lavado (Hart, 2019).

La designación de las letras de algunos químicos, así como las condiciones para su empleo se detalla a continuación:

Cuadro 1. Condiciones de operación de agentes blanqueadores

Químico	Símbolo	Concentración (%)	pH	Temperatura (°C)
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	A	4 – 6	1.8 – 5	30 – 50
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	C	2.5 – 8	2	20 – 60
Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )	D	1	0 – 6	60 – 75
Hidróxido de sodio (NaOH)	E	1.5 – 4.2	11	< 80
Hipoclorito de sodio (NaClO)	H	1 – 2	9 – 11	30 – 50
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	O	1.2 – 1.9	7 – 8	90 – 130
Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	P	0.25	10	35 – 80
Ditiosulfato sódico (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	Y	1 – 2	5.5 – 8	60 – 65
Ozono (O <sub>3</sub> )	Z	0.5 – 3.5	2 – 3	20 – 40

(Astrakianakis y Anderson, 1998 & Hart, 2019)

Algunos de estos blanqueadores se han descontinuado debido a su impacto en el ambiente y cambios legislativos sobre su uso (Hart, 2019).

## 1. Hipoclorito de sodio

Es el agente blanqueante más común, empleado desde principios del siglo XIX. Sin embargo, es un gas muy tóxico, reactivo y corrosivo en contacto con el agua. El hipoclorito de sodio oxida, proporciona brillo a la pulpa y solubiliza la lignina. No obstante, puede debilitar la pulpa si no se emplea adecuadamente (Astrakianakis y Anderson, 1998).

Se fabrica por electrólisis de salmuera, obteniéndose cloro e hidróxido de sodio en el proceso. En la industria, se utilizan tres métodos para su producción: célula de mercurio, célula de diafragma y célula de membrana (Astrakianakis y Anderson, 1998).

## 2. Dióxido de cloro

El dióxido de cloro también oxida, proporciona brillo a la pulpa y solubiliza la lignina al igual que el hipoclorito de sodio. Puede combinarse en pequeñas proporciones con el gas cloro para evitar la degradación de la pulpa, alcanzando altos grados de brillo (Astrakianakis y Anderson, 1998).

Es un gas altamente tóxico, corrosivo y extremadamente reactivo. Se elabora al reducir clorato de sodio con metanol, óxido de azufre y ácido clorhídrico. El gas debe almacenarse como una solución diluida, lo cual impide su transporte en vehículo (Astrakianakis y Anderson, 1998).

## 3. Hidróxido de sodio

Es un sólido blanco, higroscópico y altamente corrosivo. El hidróxido de sodio más puro puede obtenerse en las células de una membrana semipermeable y una cámara catódica. Se utiliza junto al peróxido de hidrógeno para producir el anión perhidroxilo, e hidrolizar y solubilizar la lignina de forma efectiva y económica. Sin embargo, tiende a oscurecer la pulpa (Astrakianakis y Anderson, 1998 & Hart, 2019).

## 4. Peróxido de hidrógeno

Es un oxidante muy versátil que puede utilizarse de forma independiente o como complemento del oxígeno para deslignificar pulpa. Se emplea usualmente en las etapas de extracción para mejorar la deslignificación y dar un brillo adicional a la pulpa (Hart, 2019).

## 5. Silicato de sodio

Frecuentemente se emplea como un estabilizador de blanqueo de peróxido. A pesar de su bajo costo, no se utiliza ampliamente en el blanqueo debido a su tendencia para formar incrustaciones en el proceso (Hart, 2019).

## 6. Sulfato de magnesio

El empleo del sulfato de magnesio como un pretratamiento de la pulpa brinda un mejor desempeño en el blanqueo, disminuye la reversión del color y mejora las propiedades físicas de la pulpa, más con el tratamiento de celulosa proveniente de fuentes coníferas (Letelier y Sanhueza, 1983).

## E. NÚMERO KAPPA

El número Kappa es proporcional a la cantidad de lignina residual en la fibra, relacionando la capacidad de blanqueo o grado de deslignificación de la pulpa. Es el volumen de una solución 0.1 N de permanganato de potasio consumido por 1 gramo de pulpa seca, después de 10 minutos de reacción a 25°C en condiciones ácidas. El exceso de volumen final de permanganato se determina por una valoración con una solución estándar de tiosulfato de sodio, después de agregar una solución de yoduro de potasio para reaccionar con el exceso de permanganato y formar yodo (Chai y Zhu, 2014 & TAPPI, 1999).

El número Kappa puede variar desde 0, correspondiente a una pulpa totalmente deslignificada y blanqueada, hasta un valor aproximado de 60 para una pulpa estándar sin blanquear. Números más altos corresponden a pulpas semiquímicas y de alta eficiencia. Normalmente, para pulpas de madera blanda, el punto de liberación de las fibras se alcanza alrededor de un número Kappa de 28 a 32. En cambio, para madera dura, se alcanza alrededor de 18-20 (Hart, 2019 & Malachowska, Dubowik, Lipkiewicz, Przybysz y Przybysz, 2020).

El costo de los agentes blanqueadores es el factor más importante que afecta el costo del blanqueo ECF y TCF. El número Kappa que se obtiene después de la cocción determina el consumo químico que, además del costo unitario de los químicos, contribuye al aumento del costo total del blanqueo (Bajpai, 2012).

Debe observarse que cocinar a un número Kappa muy bajo puede reducir el rendimiento, ya que la cocción y la deslignificación con oxígeno aumenta la carga de los sistemas de recuperación, pero también generan mayor calor en las calderas. Es notable que el desarrollo en la fabricación de una pulpa con un menor número Kappa en la etapa de deslignificación, es decir previo al blanqueo, tiene un gran impacto en la demanda de la capacidad e inversión del proceso (Bajpai, 2012).

Puede llegar a obtenerse un número Kappa bajo después de deslignificar y cocinar la pulpa mediante el blanqueo ECF, resultando en un nivel bajo de hidrógeno orgánico absorbible y teniendo contaminantes por debajo del límite de detección. Sin embargo, puede ser necesario un tratamiento externo para eliminar los cloruros del efluente del método ECF (Bajpai, 2012).

Las consideraciones principales para emplear este método son las siguientes:

- Todo el permanganato consumido se debe principalmente a la reacción con la lignina.
- Los efectos de la temperatura de reacción, tiempo y variación en el exceso de volumen de permanganato no son significativos y pueden corregirse con un factor de corrección.
- La reacción de oxidación se considera completa luego de 10 minutos.
- El tiempo de la reacción de oxidación realmente es más corto.
- El factor de corrección es empírico, derivado de una calibración experimental que puede causar errores.

- Los compuestos distintos de la lignina en la pulpa pueden oxidarse con permanganato en la primera reacción de 10 minutos.  
(Chai y Zhu, 2014)

Los cálculos del número Kappa prosiguen de la siguiente manera:

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

Donde:

$K$  = número Kappa de pulpa blanqueada

$a$  = volumen inicial de la solución 0.02 M de permanganato de potasio en la solución blanco (mL)

$w$  = masa de la muestra de pulpa seca (g)

$A_0$  = absorbancia de la solución de permanganato de potasio inicial a 553 nm, a los 0 minutos de la reacción de oxidación

$A_e$  = absorbancia de la solución de permanganato de potasio final a 553 nm, a los 10 minutos de la reacción de oxidación

(Chai y Zhu, 2014)

## F. MODELOS DE COLORES

### 1. Pantone ®

Es una empresa norteamericana creadora del sistema de color Pantone® conocido como *Pantone Matching System* (PMS), disponible para el mercado gráfico. Este permite identificar colores, estandarizarlos y reproducirlos mediante un código determinado (Pantone, 2022).

El uso de un código Pantone® permite universalizar la interpretación y los requisitos de un color específico. Para el mercado gráfico, se tiene la disponibilidad de colores directos y colores procesados (Pantone, 2022).

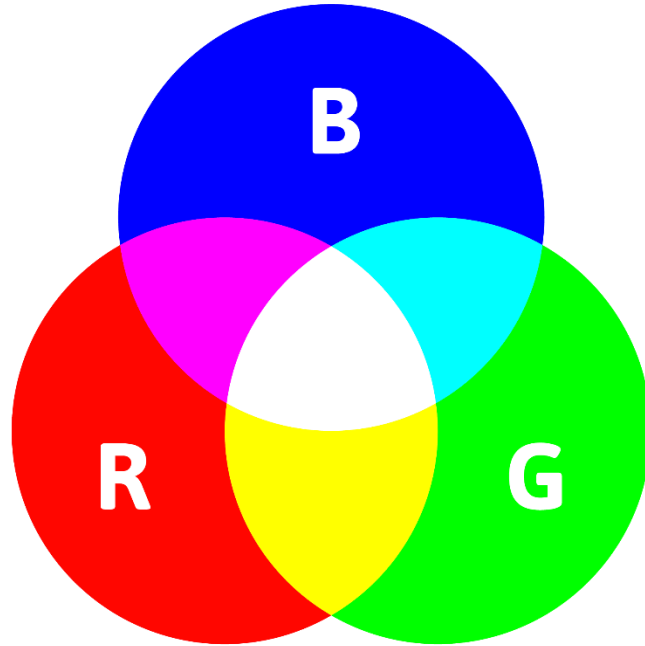
Los colores directos, también conocidos como colores sólidos, representan el color más puro y una única formulación que se aplica en un proceso de impresión. En cambio, los colores procesados surgen a partir de la combinación de distintos colores, siendo el más utilizado el sistema CMYK (Cian, Magenta, Amarillo, Negro; *Cyan, Magenta, Yellow, Black*, por sus siglas en inglés) (Pantone, 2022).

### 2. RGB

El espacio de color RGB se refiere a Rojo, Verde, Azul (*Red, Green, Blue*, por sus siglas en inglés). Es un modelo de color que combina los tres colores aditivos primarios (rojo, verde y azul) para crear colores en un espectro de luz. Se considera la base para la mayoría de las aplicaciones en pantallas (Ibraheem, Hasan, Khan y Mishra, 2012).

El modelo de color RGB se clasifica en dos tipos: lineal y no lineal. El primero alcanza la consistencia de color utilizando un sistema de gestión del color. El segundo se emplea en aplicaciones de procesamiento de imágenes, JPEG y MPEJ (Ibraheem *et al.*, 2012).

Figura 2. Modelo de color RGB



(Schot, 2022)

### 3. CMYK

Es un modelo de color sustractivo basado en los colores complementarios Cian, Magenta, Amarillo, Negro (*Cyan, Magenta, Yellow, Black*, por sus siglas en inglés). Estos son complementarios con respecto al modelo de color aditivo RGB. Generalmente se utiliza para dispositivos de salida como las impresoras (Ibraheem *et al.*, 2012).

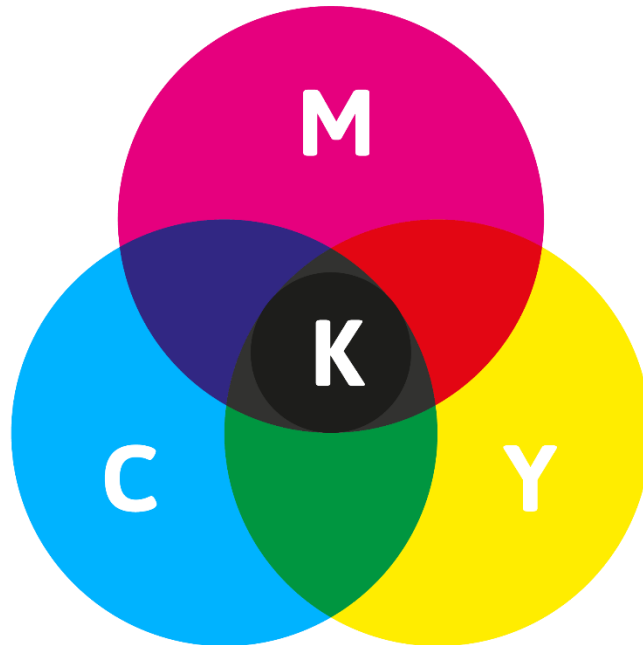
La conversión del modelo RGB a CMYK prosigue de la siguiente manera:

$$Cian|Cyan = 1 - Rojo|Red$$

$$Magenta = 1 - Verde|Green$$

$$Amarillo|Yellow = 1 - Azul|Blue$$

Figura 3. Modelo de color CMYK



(Schot, 2022)

#### 4. CIELAB

El espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$ , también conocido como CIELAB, emplea coordenadas cromáticas de luminosidad ( $L^*$ ), croma o valor rojo/verde ( $a^*$ ), matiz o valor amarillo/azul ( $b^*$ ) y reflectividad para determinar un color dentro del mismo espacio (Ibraheem *et al.*, 2012).

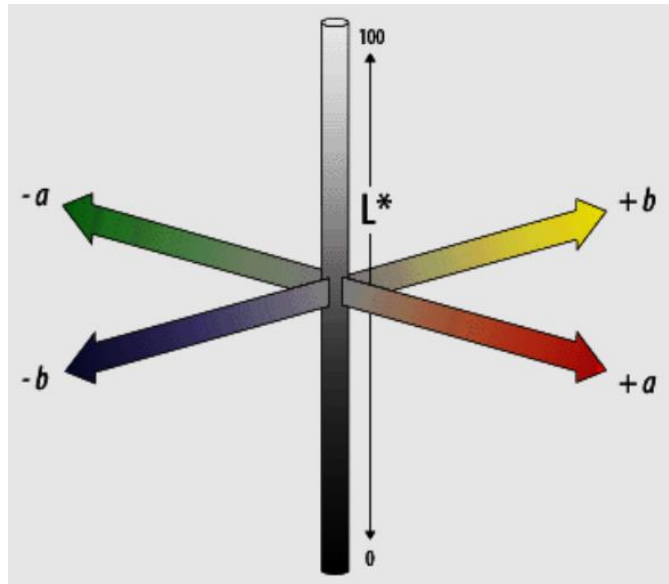
- Cuando la luminosidad del color ( $L^*$ ) tiene un valor de 0, el color es negro. Cuando tiene un valor de 100, el color es blanco.
- Cuando el croma ( $a^*$ ) presenta valores positivos, indica un color rojo. Cuando presenta valores negativos, indica un color verde.
- Cuando el matiz ( $b^*$ ) presenta valores positivos, indica un color amarillo. Cuando presenta valores negativos, indica un color azul.

(Ibraheem *et al.*, 2012)

En cuanto a la reflectividad, debe hacerse notar que el brillo es la propiedad reflectiva de la pulpa y es un fenómeno físico y medible. En algunos casos suele confundirse con la blancura, la cual es un fenómeno fisiológico medido subjetivamente por la percepción del ojo humano (U.S. Congress, 1989).



Figura 4. Modelo de color CIELAB



(Ibraheem *et al.*, 2012)

## G. COGUANOR NTG 29001

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es una organización adscrita al Ministerio de Economía. Brinda soporte técnico y normalización a los sectores público y privado a través de Comités Técnicos de Normalización (CTN) (COGUANOR, 1985).

La norma COGUANOR NTG 29001 *establece los valores de las características que definen la calidad del agua apta para consumo humano*, ya sea para alimentación o uso doméstico. Esta norma no incluye el agua purificada envasada ni el agua carbonatada (COGUANOR, 1985).

Las características químicas que debe presentar el agua apta para consumo humano se definen por el límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisible (LMP). El primero es el valor de la concentración máxima de cualquier característica del agua que puede ser percibida por el consumidor sin dañar la salud del mismo. El segundo es el valor de la concentración máxima de cualquier característica del agua donde ya no es adecuada para consumo humano (COGUANOR, 1985).

Cuadro 2. Características químicas del agua para consumo humano

Característica	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre	0.5	1.0
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	100.0	250.0
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	100.0	500.0
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	100.0	250.0
Aluminio (Al)	0.050	0.100
Calcio (Ca)	75.0	150.0
Zinc (Zn)	3.0	70.0
Cobre (Cu)	0.050	1.500
Magnesio (Mg)	50.5	100.0
Manganeso total (Mn)	0.1	0.4
Hierro total (Fe)	0.3	-

Nota: límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisible (LMP).

(COGUANOR, 1985)

## V. ANTECEDENTES

La investigación realizada por Velásquez, Mendizábal, Ramos y Guarcax (2016) presenta la producción de pasta celulósica a partir del tallo de la planta de banano para ser empleada en el diseño y fabricación de una toalla sanitaria. Se extrajo la fibra empleando una combinación de método mecánico y químico con soda para mantener un bajo costo y baja toxicidad durante el proceso. Dicha pasta celulósica produjo un pliego de bobina de 19 in × 14 in con un costo unitario de Q0.79. Asimismo, se fabricaron prototipos de toallas sanitarias con un costo unitario de Q0.81, las cuales cumplieron con la capacidad de absorción y degradabilidad esperadas. Finalmente, se evaluó la escala del proceso para una planta industrial, disminuyendo el costo unitario de las toallas sanitarias hasta Q0.25 (0.03 USD).

Zelada (2021) evaluó el proceso de deslignificación de raquis de banano por método alcalino para la producción de pulpa celulósica y con ello establecer la concentración del medio y el tiempo de cocción adecuados. Determinó las características lignocelulósicas, concentración de lignina,  $\alpha$ -celulosa, extraíbles y número Kappa de deslignificación en un rango de 29.32 a 42.41. Adicionalmente, construyó un modelo cinético para describir dicho proceso de deslignificación y oxidación de la lignina. Con ello, determinó que debe mantenerse una concentración de 8-10% de hidróxido de sodio y tiempo de cocción de 100-130 minutos a temperatura constante para la obtención de una pulpa celulósica que cumpla con los niveles adecuados de rendimiento, consistencia y número Kappa establecidos para madera blanda.

El estudio del secado de pulpa deslignificada y blanqueada de celulosa de raquis de banano realizado por Samayoa (2021) detalla los procesos que dicha pulpa requiere desde el laminado hasta el secado, incluyendo el análisis físico de la pulpa al inicio y final de los procesos, para determinar la posibilidad de una aplicación comercial de la materia prima. Se trabajó con muestras de pulpa deslignificada a diferentes condiciones de concentración de hidróxido de sodio y tiempos de cocción. Asimismo, con pulpa blanqueada por el método ECF (*Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) y TCF (*Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés). Dichas muestras fueron prensadas, laminadas y posteriormente secadas a diferentes temperaturas para obtener los parámetros y curvas de secado, analizando la pérdida de humedad con el tiempo. Con ello, se determinó que la pérdida de humedad es significativa, siendo de 82.94% (m/m) en promedio, y se estableció que las láminas desarrolladas con un espesor promedio de 2.971 mm requieren un tiempo de secado de 180 minutos en un rango de temperatura de 110-130°C, obteniendo una humedad final de 3-10% (m/m). Por último, se determinó que efectivamente existe la posibilidad del desarrollo de láminas a partir de pulpa celulósica con distintos gramajes según la aplicación comercial a la que se destine.

## VI. METODOLOGÍA

### A. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se realizó una visita a una bananera ubicada en La Gomera, Escuintla, Guatemala. El banano que se cultiva proviene de la familia Musaceae del género Cavendish y su plantación consta de 442 hectáreas, con 1,500-1,550 plantas de banano por hectárea y una producción de 3,700-3,800 cajas por hectárea. Cada caja consta de 20 racimos con un peso aproximado de 28 kg cada uno y un 8%-10% de residuo por racimo, el cual consiste en el pinzote y las hojas de la planta. Por lo tanto, se tienen alrededor de 91-94 millones de kg de residuo por en la plantación.

El cultivo del banano comienza con el corte del pinzote del árbol madre. De dicho pinzote se cortan los racimos de banano, los cuales prosiguen con las etapas de lavado, tratamiento y empaque para su exportación. En cambio, el pinzote se tritura con una trituradora de cuchillas, las fibras trituradas se recolectan en una red y se prensan con una prensa hidráulica para retirar el lixiviado. Las fibras de pinzote trituradas se emplean como abono, mientras que el lixiviado se utiliza para riego dentro de la misma plantación dado su alto contenido en nutrientes.

Tomando en cuenta la alta cantidad de residuos que se tienen en la plantación, cada 3 meses se trasladaron 2 redes de pinzote triturado desde Escuintla hacia la Universidad del Valle de Guatemala, ubicada en la ciudad capital. Para preservar las fibras y evitar su descomposición, se secaron en un horno de bandejas y se almacenaron en un lugar fresco y alejado de la luz solar. Cada red de pinzote triturado y prensado tiene un peso aproximado de 3-8 kg de fibra húmeda, obteniéndose un estimado de 2-5 kg de fibra seca.

Posterior al secado, se procedió con la deslignificación de las fibras a distintas concentraciones de hidróxido de sodio y tiempos de cocción. Las concentraciones empleadas fueron 8%, 10%, 12% y 14% (m/m) y los tiempos de cocción fueron 60, 100, 130 y 150 minutos, tal como se detalla en el trabajo *Evaluación de deslignificación de raquis de banano para la elaboración de pasta celulósica* (Zelada, 2021). Habiéndose deslignificado la pulpa, se continuó con el blanqueo de la misma utilizando 2 métodos: ECF y TCF.

Dado que la deslignificación y el blanqueo forman parte de un proceso continuo, los resultados obtenidos dependen de la cantidad de pulpa resultante de la etapa previa. Aproximadamente de 2-3 kg de fibra seca, se obtiene 1-2 kg de pulpa deslignificada, de la cual corresponden 0.5-1 kg de pulpa para blanquear por el método ECF y TCF, respectivamente.

Puesto que la pulpa blanqueada proviene de un proceso continuo, donde la deslignificación y blanqueo se desarrollaron en el mismo lugar y ambiente (Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala), bajo las mismas condiciones de temperatura y presión (24-25°C y 0.97 atm), se considera que las muestras estudiadas y los resultados obtenidos son significativos para el trabajo presente.

## B. BLANQUEO ECF

### 1. Etapa D<sub>0</sub>

- a. Pesar 1 kg de pulpa previamente deslignificada. La deslignificación puede realizarse con una solución de hidróxido de sodio al 8%, 10%, 12% y 14% (m/m) durante 60, 100, 130 y 150 minutos.
- b. Con base en la masa de la pulpa deslignificada, preparar una solución al 3% (m/m) de dióxido de cloro, 1.5% (m/m) de hidróxido de sodio y 0.6% (m/m) de peróxido de hidrógeno.
- c. Colocar la pulpa deslignificada en una doble bolsa de polietileno.
- d. Agregar el 65% de la solución de dióxido de cloro.
- e. Masajear la bolsa por 1 minuto.
- f. Sumergir la bolsa en un baño de agua a 75°C.
- g. Masajear la bolsa luego de 30 minutos.
- h. Luego de 60 minutos, escurrir, lavar la pulpa con 8 L de agua y escurrir nuevamente.

### 2. Etapa E<sub>p</sub>

- a. Colocar la pulpa en una nueva doble bolsa de polietileno con la solución de hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno.
- b. Masajear la bolsa por 1 minuto.
- c. Sumergir la bolsa en un baño de agua a 75°C.
- d. Masajear la bolsa en intervalos de 30 minutos.
- e. Luego de 90 minutos, lavar la pulpa del mismo modo que la etapa D<sub>0</sub>.

### 3. Etapa D<sub>1</sub>

- a. Colocar la pulpa en una nueva doble bolsa de polietileno.
- b. Agregar el 35% restante de la solución de dióxido de cloro.
- c. Masajear la bolsa por 1 minuto.
- d. Sumergir la bolsa en un baño de agua a 75°C.
- e. Masajear la bolsa en intervalos de 30 minutos.
- f. Luego de 90 minutos, lavar la pulpa del mismo modo que la etapa D<sub>0</sub>.

## C. BLANQUEO TCF

1. Pesar 1 kg de pulpa previamente deslignificada. La deslignificación puede realizarse con una solución de hidróxido de sodio al 8%, 10%, 12% y 14% (m/m) durante 60, 100, 130 y 150 minutos.
2. Con base en el peso de la pulpa deslignificada, preparar una solución al 3% (m/m) de peróxido de hidrógeno, 2.5% (m/m) de hidróxido de sodio, 0.2% (m/m) de sulfato de magnesio y 1% (m/m) de silicato de sodio.
3. Colocar 1 kg de pulpa deslignificada y las soluciones blanqueadoras en una doble bolsa de polietileno.
4. Sumergir la bolsa en un baño de agua a 80°C por 3 horas, mezclando en intervalos de 30 minutos.
5. Escurrir, lavar la pulpa con 8 L de agua y escurrir nuevamente.

## D. DETERMINACIÓN DE NÚMERO KAPPA

1. Preparar una solución estandarizada de 0.02 M (0.1 N) de permanganato de potasio y una solución de ácido sulfúrico 2.0 M.
2. Pesar 0.1 g de pulpa blanqueada por el método ECF y colocarla en un beaker.
3. Agregar 5 mL de la solución de permanganato de potasio y 20 mL de la solución de ácido sulfúrico y mantener agitación constante.
4. Tomar una alícuota de 2 mL de la solución de la muestra mientras se mantiene la agitación.
5. Colocar la muestra en la celda del espectrofotómetro UV/VIS para realizar la lectura.
6. Realizar el procedimiento durante 10 minutos de agitación, tomando muestras cada 2 minutos.
7. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método TCF.

## E. DETERMINACIÓN DE PH

### 1. pH de pulpa

- a. Pesar una muestra de pulpa deslignificada y colocarla en un beaker.
- b. Agregar 5 mL de agua desmineralizada y macerar hasta que la muestra se desintegre.
- c. Agregar la cantidad de agua necesaria para aforar a un volumen de 70 mL.
- d. Tapar el beaker con un vidrio de reloj y reposar por 1 hora a temperatura ambiente.
- e. Sumergir un potenciómetro en la solución para realizar la lectura del pH.
- f. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

### 2. pH de licor

- a. Tomar una muestra del licor obtenido de cada etapa del blanqueo ECF.
- b. Enfriar la muestra a temperatura ambiente.
- c. Sumergir un potenciómetro en la solución para realizar la lectura del pH.
- d. Repetir el procedimiento con el licor obtenido del blanqueo TCF.

## F. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

1. Pesar una muestra de pulpa deslignificada.
2. Sumergir la muestra en una probeta con un volumen conocido de etanol y anotar el desplazamiento.
3. Determinar la densidad con la razón de la masa y el volumen de etanol desplazado por la muestra.
4. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

## G. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD

1. Empleando un analizador de humedad Ohaus MB120, crear un nuevo método de análisis de pulpa en la biblioteca de métodos, configurando la temperatura de secado a 105°C.
2. Seleccionar el método de secado de pulpa.
3. Abrir la tapa del analizador de humedad y limpiar el plato de muestras.
4. Cerrar la tapa y establecer la tara del plato.
5. Abrir la tapa del analizador y colocar 0.500 g de pulpa deslignificada.
6. Cerrar la tapa para iniciar el secado de la muestra. El analizador inicia automáticamente el proceso de secado y medición.
7. Al finalizar el secado, tomar la lectura del contenido de humedad y tarar nuevamente el plato.
8. Abrir la tapa del analizador y limpiar el plato de muestras.
9. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

## H. DETERMINACIÓN DE COLOR PANTONE®

1. Colocar una muestra de pulpa deslignificada en una caja Petri.
2. Buscar, comparar y seleccionar en la carta Pantone® el color que más se asemeje a la muestra.
3. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

## I. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CIELAB

1. Empleando un densitómetro X-Rite® eXact Basic, deslizar el interruptor de medición de condiciones hasta la posición M1 para configurar la reflectancia con luz D50.
2. Seleccionar el análisis CIE L\*a\*b\* en la pantalla principal.
3. Abrir el densitómetro y colocar la ventana sobre la muestra de cartón.
4. Cerrar el densitómetro para realizar la medición.
5. Repetir el procedimiento con cartón elaborado a partir de pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

## J. DETERMINACIÓN DE CLORUROS

1. Preparar una solución con 0.010 g de cloruro de potasio, previamente secado a 500°C hasta peso constante, y 5 mL de agua destilada.
2. Preparar una solución estandarizada de 0.1 M de nitrato de plata.
3. Tomar una muestra de 10 mL de licor de blanqueo ECF y agregar 4 gotas de indicador de cromato de potasio.
4. Valorar la muestra con la solución de nitrato de plata hasta observar un color rojizo/café pálido que permanezca por más de 30 segundos.
5. Realizar la valoración para 4 muestras y repetir el procedimiento para el licor obtenido de cada etapa del blanqueo ECF.

## K. DETERMINACIÓN DE SULFATOS

### 1. Preparación de crisoles

- a. Colocar 6 crisoles, previamente lavados, en una mufla y calentarlos por 30 minutos a 400°C.
- b. Trasladarlos a un horno y calentarlos por 10 minutos a 110°C.
- c. Trasladarlos a una desecadora y enfriarlos por 10 minutos.
- d. Determinar la masa del crisol y su tapa con una balanza analítica hasta 0.0001 g.
- e. Repetir el procedimiento hasta que la masa del crisol y su respectiva tapa no difiera por más de 0.0002 g.

### 2. Precipitación y digestión

- a. Preparar una solución de 0.01 M de cloruro de bario.
- b. Tomar una muestra de 25 mL de licor de blanqueo TCF y colocarla en un beaker.
- c. Agregar 100 mL de agua desmineralizada y 0.5 mL de ácido clorhídrico concentrado.
- d. En una estufa, calentar la solución de la muestra por debajo del punto de ebullición. Aparte, calentar la solución de cloruro de bario.
- e. Lentamente y con agitación, utilizando una varilla de vidrio, agregar 25 mL de la solución caliente de cloruro de bario a la solución caliente de la muestra.
- f. Reposar la muestra para asentar el precipitado.
- g. Dejar la varilla de vidrio en el beaker, cubrirlo con un vidrio de reloj y digerir el precipitado en un baño térmico a 70-80°C durante 30 minutos.

### 3. Filtración y lavado

- a. Preparar un sistema de filtrado, empleando un embudo con papel filtro Whatman No. 40.
- b. Utilizando la varilla, transferir gradualmente el sobrenadante y el precipitado caliente al sistema de filtración.
- c. Lavar el beaker y el filtro con porciones de 5 mL agua desmineralizada caliente.
- d. Acidificar algunos mililitros del agua de lavado con unas gotas de ácido nítrico. Si se observa turbidez, continuar lavando el precipitado con agua caliente.
- e. Cuidadosamente, aflojar el papel filtro del embudo, escurrirlo por unos minutos, doblarlo formando un paquete y colocarlo sobre un vidrio de reloj. Si no es posible manipular el papel, secar el embudo en el horno a 110°C antes de continuar.

### 4. Calcinación

- a. En una estufa, evaporar la mayor cantidad del agua de lavado hasta dejar 20-25 mL, aproximadamente. Trasladar dicho volumen restante a un crisol y evaporar completamente.
- b. Colocar el papel filtro doblado dentro del crisol e incendiarlo para quemarlo hasta que las cenizas sean grises/blancas.
- c. Trasladar los crisoles a una mufla y calentarlos por 30 minutos a 550°C.
- d. Trasladarlos a un horno y calentarlos por 25 minutos a 110°C.
- e. Trasladarlos a una desecadora, enfriarlos por 15 minutos y pesarlos con su respectiva tapa.

## L. DETERMINACIÓN DE MAGNESIO

### 1. Volumetría de formación de complejos

- a. Preparar una solución con 0.93 g de dihidrato de sal disódica de EDTA disueltos en 125 mL de agua desmineralizada. Aforar a 250 mL.
- b. Preparar una solución buffer con 6.75 g de cloruro de amonio disueltos en 20 mL de agua desmineralizada. Agregar 57 mL de solución concentrada de hidróxido de amonio y aforar a 100 mL.
- c. Preparar una solución patrón de magnesio.
- d. Valorar la solución de EDTA con la solución patrón de magnesio utilizando el indicador negro de eriocromo T.
  - 1) Transferir una alícuota de 10 mL de la solución patrón de magnesio a un Erlenmeyer.
  - 2) Agregar 10 mL de la solución buffer y 4 gotas del indicador negro de eriocromo T.
  - 3) Verificar que la solución tenga un pH cercano a 10.
  - 4) Valorar la mezcla de soluciones de magnesio y buffer con la solución de EDTA hasta observar un color azul.
- e. Tomar una muestra de 20 mL de licor de blanqueo TCF y colocarla en un Erlenmeyer.
- f. Agregar 10 mL de la solución buffer y 4 gotas del indicador negro de eriocromo T.
- g. Valorar la muestra con la solución de EDTA hasta observar un color azul.
- h. Realizar un duplicado de cada muestra.

## M. DETERMINACIÓN DE SODIO

1. Preparar una solución de 0.25 M de ácido clorhídrico.
2. Tomar una muestra de 25 mL de licor de blanqueo TCF y agregar 2 gotas de indicador de fenolftaleína.
3. Valorar la muestra con la solución de ácido clorhídrico hasta observar un color rosado pálido que permanezca por más de 30 segundos.
4. Realizar un duplicado de cada muestra y repetir el procedimiento para el licor obtenido de la etapa E<sub>P</sub> y D<sub>1</sub> del blanqueo ECF.



## N. ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE FIBRAS

1. Colocar una muestra de pulpa deslignificada en un portaobjetos y cubrirla con un cubreobjetos. Si es necesario, colocar una gota de agua desmineralizada sobre la muestra para que ambos vidrios se adhieran adecuadamente y no se observen burbujas de aire en el microscopio.
2. Empleando un microscopio Fisher Scientific Micromaster, colocar el portaobjetos sobre el cristal y sujetarlo con las pinzas.
3. Encender el iluminador, ajustar el microscopio con el lente PL4/0.1 160/- y mover las perillas para enfocar la muestra.
4. Repetir el procedimiento con pulpa blanqueada por el método ECF y TCF.

## O. SECADO DE PINZOTE

1. Cortar el pinzote de banano en trozos medianos.
2. Triturar los trozos empleando una trituradora de cuchillas hasta obtener fibras gruesas.
3. Prensar las fibras húmedas con una prensa hidráulica para retirar el exceso de agua.
4. Deshacer la torta prensada y separar las fibras.
5. Empleando un secador de bandejas, colocar las fibras de pinzote sobre las bandejas y secar por 180 minutos en un rango de temperatura de 110-130°C.
6. Guardar el pinzote en un ambiente fresco y seco para preservarlo hasta su uso posterior en la deslignificación.

## VII. RESULTADOS

Cuadro 3. Número Kappa promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Número Kappa
ECF	34.73 ± 4.57
TCF	39.06 ± 4.57

Cuadro 4. pH promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	pH
Original	10.51 ± 0.87
ECF	9.20 ± 0.38
TCF	8.70 ± 0.13

Nota: el pH fue determinado a una temperatura promedio de 24°C.

Cuadro 5. pH promedio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

Etapas	pH
D <sub>0</sub>	9.80 ± 0.62
E <sub>P</sub>	12.46 ± 0.11
D <sub>1</sub>	10.10 ± 1.38

Nota 1: el pH fue determinado a una temperatura promedio de 20°C.

Nota 2: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Cuadro 6. pH promedio del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

Etapas	pH
P	12.43 ± 0.10

Nota 1: el pH fue determinado a una temperatura promedio de 20°C.

Nota 2: etapa P correspondiente a peróxido de hidrógeno.

Cuadro 7. Densidad promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

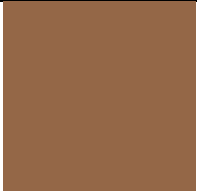
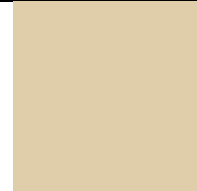
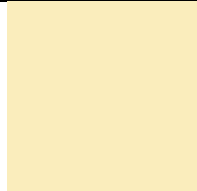
Método	Densidad (±0.022 g/mL)
Original	0.970
ECF	0.978
TCF	0.936

Cuadro 8. Contenido de humedad promedio de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Contenido de humedad (% MC)
Original	89.41 ± 1.02
ECF	88.38 ± 1.20
TCF	87.93 ± 1.80

Nota: mediciones efectuadas con un analizador de humedad Ohaus MB120.


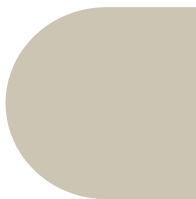
Cuadro 9. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Original		ECF		TCF	
Código Pantone®	725 U		468 U		7499 U	
Composición	Orange 021	63.20	Yellow	1.90	Yellow	1.30
	Black	11.80	Rub. Red	0.80	Rub. Red	0.20
	Trans. Wt.	25.00	Pro. Blue	0.40	Trans. Wt.	98.50
			Trans. Wt.	96.90		
Color						

Nota 1: mediciones efectuadas con una carta de colores Pantone® sin barniz, con luz natural.

Nota 2: U (Uncoated), Trans. Wt. (Transparent White), Rub. Red (Rubine Red), Pro. Blue (Process Blue).

Cuadro 10. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB

Método	ECF	TCF
Luminosidad (L*)	77.25 ± 0.93	80.37 ± 1.12
Valor rojo/verde (a*)	-0.04 ± 1.43	-0.46 ± 1.32
Valor azul/amarillo (b*)	14.08 ± 3.94	9.74 ± 1.57
Reflectividad	18.67% ± 1.00%	20.56% ± 0.53
Color		

Nota: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Cuadro 11. Concentración de cloruros, sulfatos y magnesio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Parámetro	Concentración (mg/L)	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)	Criterio
ECF	Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	1598.20	100.0	250.0	No cumple
TCF	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	301.54	100.0	250.0	No cumple
TCF	Magnesio (Mg)	Indeterminado	50.0	100.0	Indeterminado

Nota: límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisible (LMP) permitidos por la norma COGUANOR NTG 29001.

Cuadro 12. Costo variable de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Costo	
	Q/kg	USD/kg
ECF	23.12	2.99
TCF	4.77	0.62

Nota: costo determinado con base en 1 kg de pulpa blanqueada.

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La decoloración de pulpa deslignificada se evaluó con dos métodos diferentes: ECF y TCF, siendo el blanqueo ECF libre de cloro elemental (*Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés) y el blanqueo TCF totalmente libre de cloro (*Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés). Con ello, se compararon los cambios físicos de la pulpa antes y después de cada método de blanqueo, tomando en cuenta los costos variables involucrados y las concentraciones de contaminantes en el licor de ambos métodos.

Se determinó que el número Kappa de la pulpa blanqueada por el método ECF (34.73) es menor que el método TCF (39.06) (ver Cuadro 3). Dado que el número Kappa es proporcional a la cantidad de lignina residual en la pulpa, se obtuvo una menor cantidad de lignina en la pulpa blanqueada por el método ECF que TCF, lo cual implica que la pulpa continúa deslignificándose durante el proceso. Debe hacerse notar que la desviación estándar del número Kappa para ambos métodos presentó un valor de 4.57, siendo una variación considerable ya que las muestras analizadas provinieron de distintas condiciones de deslignificación. Como puede observarse en el Cuadro 26, se evaluaron muestras deslignificadas a varias concentraciones de NaOH y tiempos de cocción con ambos métodos de blanqueo.

El pH de la pulpa deslignificada original (10.51) fue mayor que el de la pulpa blanqueada por ambos métodos, siendo 9.20 para el método ECF y 8.70 para TCF (ver Cuadro 4). Puesto que la pulpa proviene de un tratamiento totalmente alcalino para su deslignificación, con una concentración del 8% de hidróxido de sodio, se esperaba que el pH de la pulpa blanqueada fuese menor al tratarse con concentraciones menores del mismo reactivo (1.5% para ECF y 2.5% para TCF). También, se observa que el pH de la pulpa del blanqueo TCF es menor que el ECF ya que el silicato de sodio involucrado en el proceso estabiliza la reacción.

Para el licor de cada etapa del método ECF, se tiene que el pH de las etapas D<sub>0</sub> (9.80) y D<sub>1</sub> (10.10) es menor que la etapa E<sub>P</sub> (12.46) (ver Cuadro 5). La etapa E<sub>P</sub> implica el uso de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y, a pesar de los lavados de la pulpa, se tienen residuos de esta base que se trasladan a la última etapa y, por ello, la etapa final D<sub>1</sub> presentó un pH mayor que la etapa inicial D<sub>0</sub>, a pesar de que únicamente se emplee dióxido de cloro en ambas. En cambio, para el método TCF, se tiene un pH similar a la etapa E<sub>P</sub> del método ECF, siendo 12.43 y 12.46, respectivamente (ver Cuadro 6). Esto también se debe al uso del hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno durante la cocción.

La densidad de la pulpa deslignificada original y blanqueada por el método ECF y TCF fue menor que la unidad, siendo 0.970 g/mL, 0.978 g/mL y 0.936 g/mL, respectivamente (ver Cuadro 7). Durante la experimentación, inicialmente se empleó agua para determinar la densidad. Sin embargo, la muestra de pulpa permaneció flotando en la superficie al momento de dejarla caer en la probeta, por lo que el volumen de agua desplazado no fue certero. Además, ello implicó que la densidad de la pulpa es menor que la del agua, por lo que se realizó el cambio a un medio con menor densidad para que la pulpa no flotase, siendo el etanol el más adecuado para este fin. Luego de realizar las pruebas con etanol, la pulpa efectivamente se hundió hasta el fondo de la probeta y el volumen desplazado por la misma fue determinado con mayor convicción. Se resalta que la densidad de la pulpa blanqueada por el método TCF es menor que la del método ECF.

El contenido de humedad de la pulpa deslignificada original y blanqueada por ambos métodos (ECF y TCF) es similar, siendo 89.41%, 88.38% y 87.93%, respectivamente (ver Cuadro 8). Ello implica que la capacidad de absorción de las fibras antes y después del blanqueo no se ven alteradas.

En términos generales, no se percibieron cambios significativos de pH, densidad y humedad de la pulpa antes y después de la decoloración por el método ECF y TCF. Únicamente se resalta la diferencia en el número Kappa dada la deslignificación continua que se tiene en el proceso.

La apariencia de la pulpa blanqueada por el método TCF fue más brillante, clara, blanda y suave que la pulpa blanqueada por el método ECF, la cual presentó una apariencia opaca, áspera, dura e irregular. Se observó que el color de las fibras no fue el mismo ya que había zonas de fibras más oscuras en la misma muestra (ver Figura 27 y 28). Se mencionó que la pulpa continúa deslignificándose en el blanqueo ECF, no obstante, no se obtuvo fibras más blandas a pesar de presentar una menor cantidad de lignina como indica el número Kappa.

Dado que la percepción de los colores para el ojo humano es distinta para cada persona, se determinó una referencia estándar del color de la pulpa observado durante el blanqueo ECF y TCF, en comparación con la apariencia inicial, eligiendo un código Pantone® para representar dicho color y observar la estabilidad y reproducibilidad del proceso de blanqueo (ver Cuadro 9). Como se mencionó anteriormente, se observó que la decoloración con el método TCF proporcionó una pulpa más clara y homogénea; caso contrario ocurrido con el método ECF. Pese a la diferencia observada en ambas muestras, se apreció significativamente la decoloración en comparación con la pulpa deslignificada original para ambos métodos, la cual presentó un color café y aspecto medianamente brillante (ver Figura 26).

Con los parámetros del modelo cromático CIELAB, se obtuvo que la pulpa blanqueada por el método TCF presentó una mayor luminosidad y reflectividad (80.37 y 20.56%) que el método ECF (77.25 y 18.67%, respectivamente) (ver Cuadro 10). Asimismo, se tuvo un menor valor azul/amarillo (9.74 para TCF y 14.08 para ECF), indicando una apariencia con menor tendencia al color amarillo para el método TCF, el cual se evidencia en las Figuras 27 y 28 (ver Anexos). Dados dichos parámetros, junto al sensorial percibido de las fibras de la pulpa, se obtuvo que el blanqueo TCF proporcionó una pulpa con mejor apariencia que el blanqueo ECF.

Ambos métodos de blanqueo no cumplieron con los límites máximos aceptables y permisibles establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001 para cloruros y sulfatos, puesto que sobrepasaron los valores dictaminados. Se obtuvo una concentración de 1598.20 mg/L de cloruros en el licor del blanqueo ECF y una concentración de 301.54 mg/L de sulfatos para el licor del blanqueo TCF, ambos con un límite máximo aceptable de 100.0 mg/L y un límite máximo permisible de 250.0 mg/L (ver Cuadro 11). Se resalta que la metodología de volumetría de formación de complejos empleada no permitió determinar la concentración de magnesio, por lo que no pudo evaluarse el cumplimiento de dicho parámetro con la norma.

Durante la experimentación para la valoración del magnesio, se observó que la muestra de licor se tornó de un color azul intenso con sólo agregar el indicador negro de eriocromo T (ver Figura 32). Ello indicó una presencia tan baja de magnesio en el licor que no pudo cuantificarse por esta metodología.

El análisis económico se enfocó en establecer el costo variable de los reactivos y servicios consumidos por cada método de blanqueo, tomando como base de cálculo el blanqueo de 1 kg de pulpa en 4.75 horas para el método ECF y 3.25 horas para el método TCF en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Entre los supuestos tomados en cuenta para determinar el costo se tuvo que el costo fijo del servicio de agua potable y energía eléctrica fue adquirido por la Universidad, por lo que únicamente se tomó el costo variable correspondiente al uso de la estufa eléctrica y el agua empleada directamente en el tratamiento y lavado de la pulpa dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Se obtuvo que el costo variable para el blanqueo de pulpa por el método ECF fue de Q23.12/kg (2.99 USD/kg) y para el método TCF fue de Q4.77/kg (0.62 USD/kg), siendo el último el más económico (ver Cuadro 12). Esta diferencia se debe principalmente al uso de dióxido de cloro y cantidad de etapas de cocción en el método ECF. El costo unitario del dióxido de cloro (Q14.60, 1.89 USD) es aproximadamente 10 veces mayor que el costo total de reactivos empleados en el método TCF (Q1.41, 0.18 USD) (ver Cuadro 53 y 54). También, el costo unitario de las bolsas plásticas utilizadas en cada etapa de blanqueo incrementa ya que el método ECF requiere de 3 etapas (Q6.60, 0.85 USD) mientras que el método TCF únicamente 1 etapa para el tratamiento de la pulpa (Q2.20, 0.28 USD).

En términos generales, el blanqueo TCF proporcionó una mejor calidad de pulpa en términos de apariencia y costo variable que el método ECF. No obstante, debe evaluarse la reducción del impacto ambiental con el tratamiento de los sulfatos presentes en el licor.

Adicionalmente, se evaluó el cambio en la estructura de las fibras antes y después de la decoloración por medio de un microscopio, con diferentes muestras de pulpa deslignificada con concentraciones de hidróxido de sodio que van desde el 8% hasta el 12% y tiempos de cocción desde 100 min a 150 min. Se observó que las fibras no presentan daños o rupturas con ninguno de los métodos de blanqueo ya que la estructura alargada y delgada de las fibras permanece intacta, independientemente del proceso de deslignificación previo (ver Figura 33).

Finalmente, se evaluó la aplicación de la pulpa deslignificada y blanqueada a nivel industrial para la producción de cartones de huevo en una planta ubicada en el departamento de Escuintla, Guatemala. Para la fabricación de las bandejas, se requirió una menor cantidad de pulpa en comparación con la cantidad de papel reciclado que se emplea para su producción. El resultado fue un cartón resistente, más liviano y flexible que el cartón fabricado con el papel reciclado. Cabe resaltar que el pigmento verde empleado para colorear el cartón de huevos fue lo suficientemente intenso para enmascarar el color café de la pulpa deslignificada original, por lo que no se requirió del blanqueo de la pulpa para dicha aplicación industrial (ver Figura 37). Debe considerarse que la coloración de los cartones de huevo puede variar según la empresa, no es un aditivo estándar ni obligatorio para dicho mercado, sino un diferenciador. Es posible que aquellas empresas que no pigmenten los cartones sí requieran del blanqueo de la pulpa para mejorar la apariencia y brillo del producto final en comparación con aquellas que decidan colorearlos.

## IX. CONCLUSIONES

- No se percibieron cambios significativos de pH, densidad y humedad de la pulpa antes y después de la decoloración por el método ECF y TCF. Únicamente se resalta la diferencia en el número Kappa dada la deslignificación continua que se tiene en el proceso.
- La apariencia de la pulpa blanqueada por el método TCF (Pantone® 7499 U) fue más brillante, clara, blanda y suave que la pulpa blanqueada por el método ECF (Pantone® 468 U), la cual presentó una apariencia opaca, dura e irregular. Tomando en cuenta los parámetros del modelo cromático CIELAB para el método ECF y TCF (luminosidad de 77.25 y 80.37, valor azul/amarillo de 14.08 y 9.74, y reflectividad de 18.67% y 20.56%, respectivamente) se obtuvo que el blanqueo TCF proporcionó una pulpa con mejor tonalidad que el blanqueo ECF.
- Ambos métodos de decoloración (ECF y TCF) no cumplieron con los límites máximos aceptables y permisibles establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001 para cloruros y sulfatos, mientras que no se pudo determinar la concentración de magnesio con la metodología de volumetría de formación de complejos propuesta. Asimismo, se obtuvo que el costo variable a escala laboratorio para el blanqueo de pulpa por el método ECF y TCF fue de Q23.12 (2.99 USD) y Q4.77 (0.62 USD) por kilogramo, respectivamente. Por lo tanto, el blanqueo TCF es más económico que el método ECF.

## X. RECOMENDACIONES

- Emplear ambos métodos de blanqueo (ECF y TCF) con la misma muestra de pulpa deslignificada para evaluar si aumenta el grado de decoloración, sin dañar la estructura fisicoquímica de las fibras.
- Estudiar el proceso de blanqueo ECF únicamente con las etapas D<sub>0</sub> y E<sub>p</sub>, prescindiendo de la etapa D<sub>1</sub>, puesto que no se percibe un cambio significativo en el color y forma de la pulpa, además de que el 35% de la solución de dióxido de cloro restante no es suficiente para sumergir completamente la pulpa durante la cocción.
- Estudiar la cinética de reacción de cada método de blanqueo para comprender con mayor detalle la interacción entre los agentes blanqueadores y los componentes de las fibras. Además, para evaluar la continuidad de la deslignificación de la pulpa dado el tratamiento con hidróxido de sodio que se presenta en ambos métodos de blanqueo (ECF y TCF).
- Estudiar la resistencia mecánica y elástica de la pulpa blanqueada por cada método (ECF y TCF) para evaluar las distintas aplicaciones de la pulpa en la producción de cartón, papel, materiales absorbentes, embalajes y otros.
- Dadas las altas concentraciones de cloruros y sulfatos presentes en el licor obtenido del lavado de la pulpa blanqueada, evaluar el diseño del tratamiento de aguas residuales del proceso para cumplir con los parámetros establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001.
- Determinar la concentración de magnesio con una metodología distinta de la volumetría de formación de complejos para cuantificar su contenido en el licor obtenido del lavado de la pulpa blanqueada y evaluar el cumplimiento con los parámetros establecidos por la norma COGUANOR NTG 29001.
- Determinar la composición del licor obtenido del lavado de ambos métodos de blanqueo (ECF y TCF) por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) para identificar y cuantificar las concentraciones de las distintas sustancias en el mismo.
- Realizar una proyección de la producción de pulpa blanqueada en una planta piloto para obtener un estudio económico más detallado y acertado de la inversión, costos, utilidades y retorno del proceso.



## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Astrakianakis, G.; Anderson, J. (1998). *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. 4ta Edición. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.
- Bajpai, P. (2012). *Environmentally benign approaches for pulp bleaching*. Segunda edición. Elsevier.
- Banco de Guatemala (2022). Tipo de cambio. Recuperado el 09/06/2022 de: [https://banguat.gob.gt/tipo\\_cambio/](https://banguat.gob.gt/tipo_cambio/)
- Chai, X.; Zhu, J. (2014). Rapid Pulp Kappa Number Determination Using Spectrophotometry. *Journal of Pulp and Paper Science*.
- Chávez, M.; Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones; Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46.
- Danielewicz, D.; Surma-Slusarska, B. (2011). Pulping and bleaching OCC. Part II. Oxygen delignification and bleaching. *Appita Journal*, 64(1), 66.
- Fuentes, J.; Uribe, G. (2009). Aplicación de blanqueo TCF en mezclas de fibras químicas y mecánicas recicladas: alternativa para la industria papelera. *Energética*, 42, 9-20.
- Hart, P. (2019). *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ibraheem, N.; Hasan, M.; Khan, R.; Mishra, P. (2012). Understanding Color Models: A Review. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2(3), 265-275.
- Jain, R.; Urban, L.; Balbach, H.; Webb, D. (2012). *Handbook of Environmental Engineering Assessment*. Butterworth-Heinemann.
- Keefe, A.; Teschke, K. (1998). *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. 4ta Edición. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.
- Letelier, A.; Sanhueza, J. (1983). Blanqueo con oxígeno en pulpa Kraft de pino insigne. *Congreso Anual da ABCP*, 2, 529-538.
- Loureiro, P.; Domingues, E.; Evtuguin, D.; Graça, M.; Carvalho, V. (2010). ECF bleaching with a final hydrogen peroxide stage: impact on the chemical composition of *Eucalyptus globulus* kraft pulp. *BioResources*, 5(4), 2567-2580.
- Malachowska, E.; Dubowik, M.; Lipkiewicz, A.; Przybysz, K.; Przybysz, P. (2020). Analysis of Cellulose Pulp Characteristics and Processing Parameters for Efficient Paper Production. *Sustainability*, 12(17), 7219.
- Martínez, C.; Cayón, G.; Ligarreto, G. (2016). Composición química y distribución de materia seca del fruto en genotipos de plátano y banano. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 217-227.
- Comisión Guatemalteca de Normas [COGUANOR]. (1985). *Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 29001. Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones*. Comisión Guatemalteca de Normas. Guatemala.
- Pantone. (2022). Sistemas de Color Pantone – Para Gráficos. Recuperado el 09/06/2022 de: <https://www.pantone.com/eu/es/sistemas-de-color/para-graficos>
- Samayoa, A. (2021). *Evaluación del secado de pasta deslignificada y blanqueada de celulosa de raquis de banano*. Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.

Schot. (2022). RGB en CMYK, wat is het verschil? Recuperado el 09/06/2022 de: <https://schot.nl/veelgestelde-vragen/rgb-en-cmyk-wat-is-het-verschil>

Sharma, N.; Bhardwaj, N.; Singh, R. (2020). Environmental issues of pulp bleaching and prospects of peracetic acid pulp bleaching. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120338.

Technical Association of the Pulp Paper Industry [TAPPI]. (1999). T 236 om-99. Kappa number of pulp.

Turrado, J.; Saucedo, A.; Sanjuán, R.; Sulbaran, B. (2009). Pinzote de *Musa balbisiana* y *Musa acuminata* como fuente de fibras para papel. *Información Tecnológica*, 20(4), 117-122.

U.S. Congress, Office of Technology Assessment- (1989). *Technologies for Reducing Dioxin in the Manufacture of Bleached Wood Pulp*. U.S. Government Printing Office. Washington, U.S.

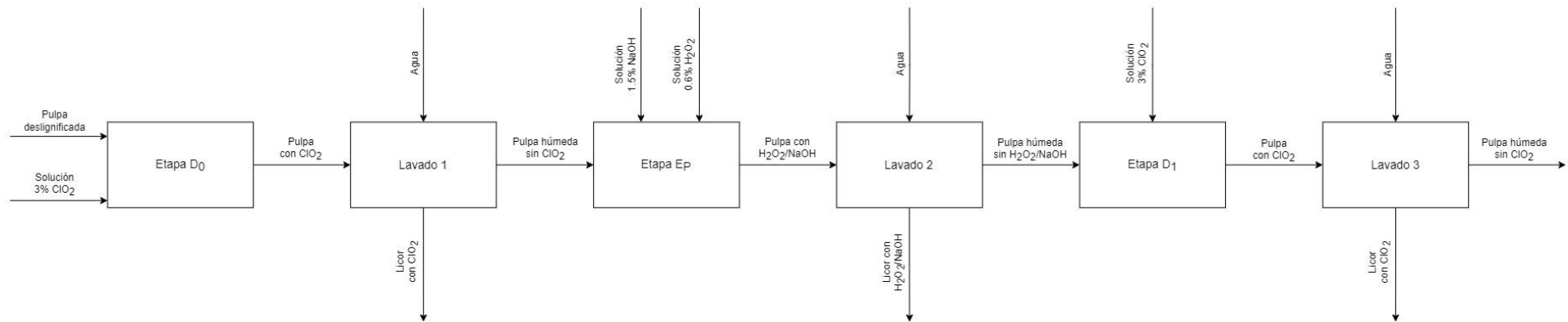
Velásquez, A.; Mendizábal, M.; Ramos, M.; Guarcax, S. (2016). *Diseño de una toalla sanitaria biodegradable a partir del tallo de la planta de banano. Fase desarrollo*. Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.

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

## XII. ANEXOS

### A. DIAGRAMA DE BLOQUES

Figura 5. Diagrama de bloques del blanqueo de pulpa deslignificada con el método ECF

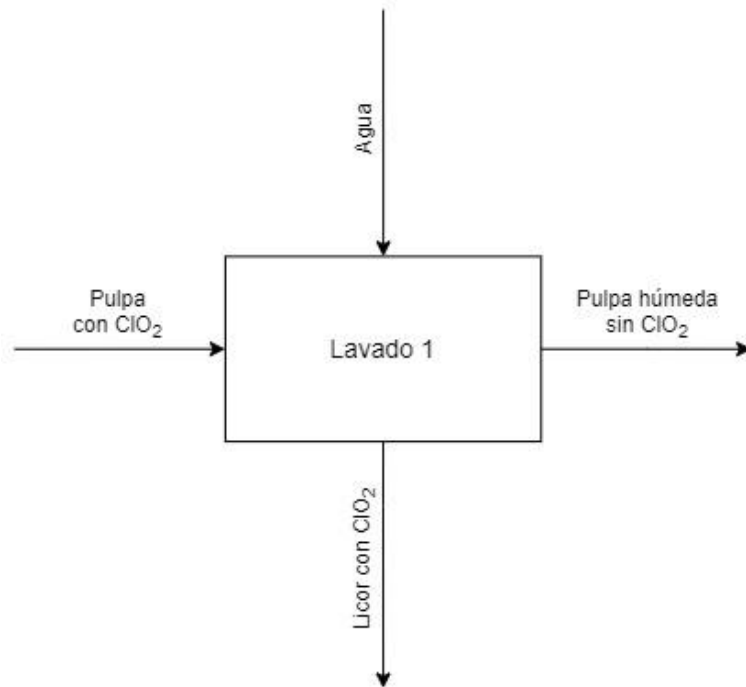


(Elaboración propia)

Figura 6. Flujos de entrada y salida de la etapa D<sub>0</sub> del blanqueo con el método ECF



Figura 7. Flujos de entrada y salida del lavado 1 del blanqueo con el método ECF



(Elaboración propia)

Figura 8. Flujos de entrada y salida de la etapa  $E_p$  del blanqueo con el método ECF

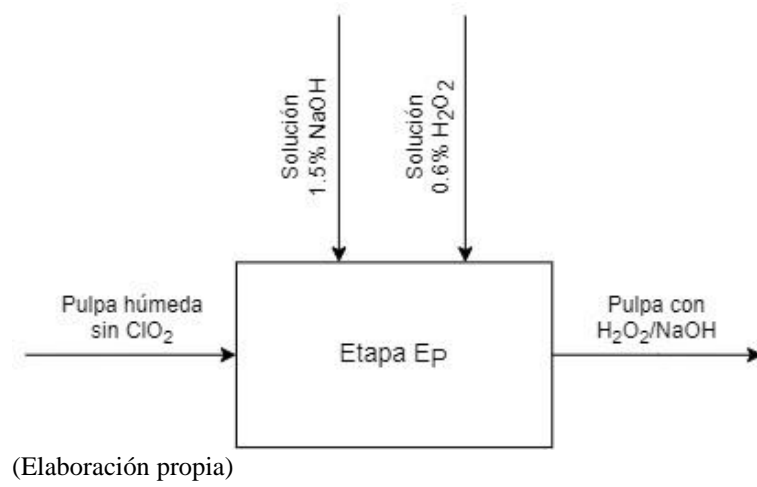


Figura 9. Flujos de entrada y salida del lavado 2 del blanqueo con el método ECF

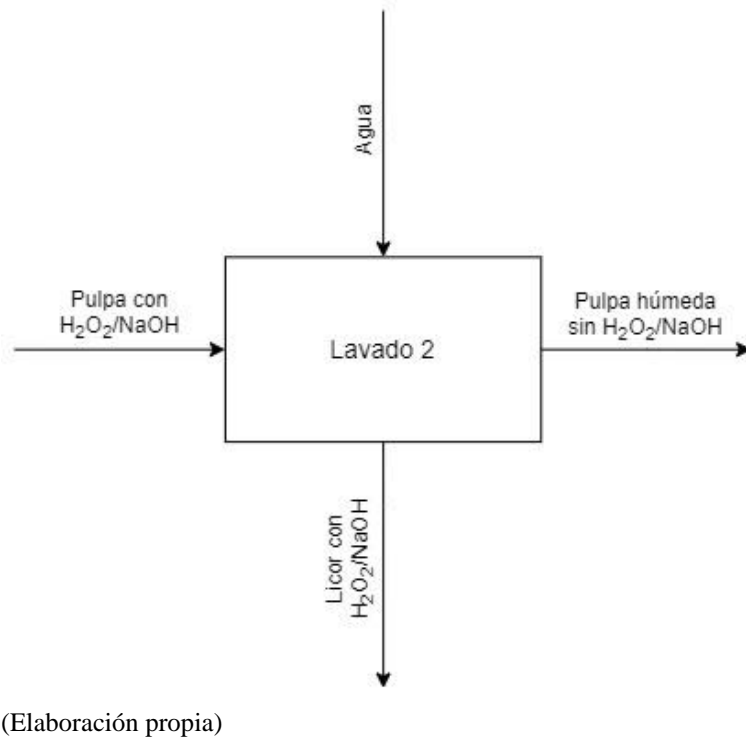


Figura 10. Flujos de entrada y salida de la etapa D<sub>1</sub> del blanqueo con el método ECF

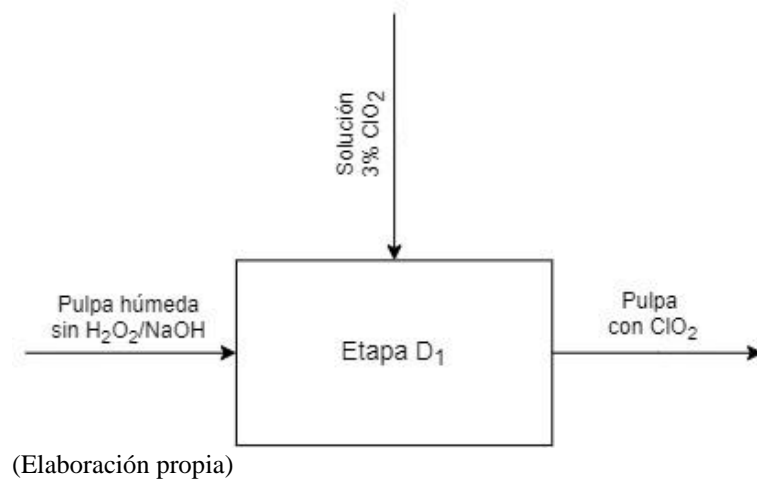


Figura 11. Flujos de entrada y salida del lavado 3 del blanqueo con el método ECF

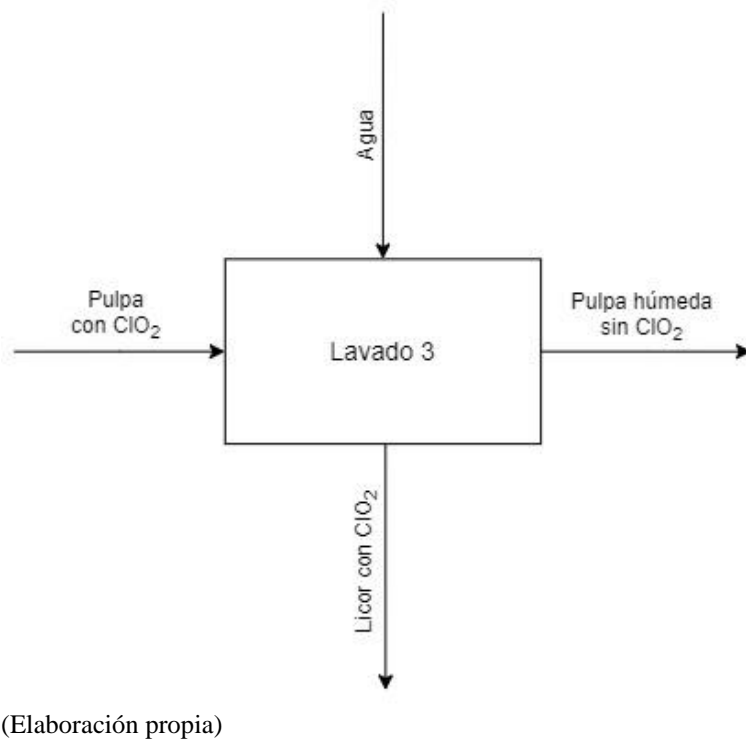
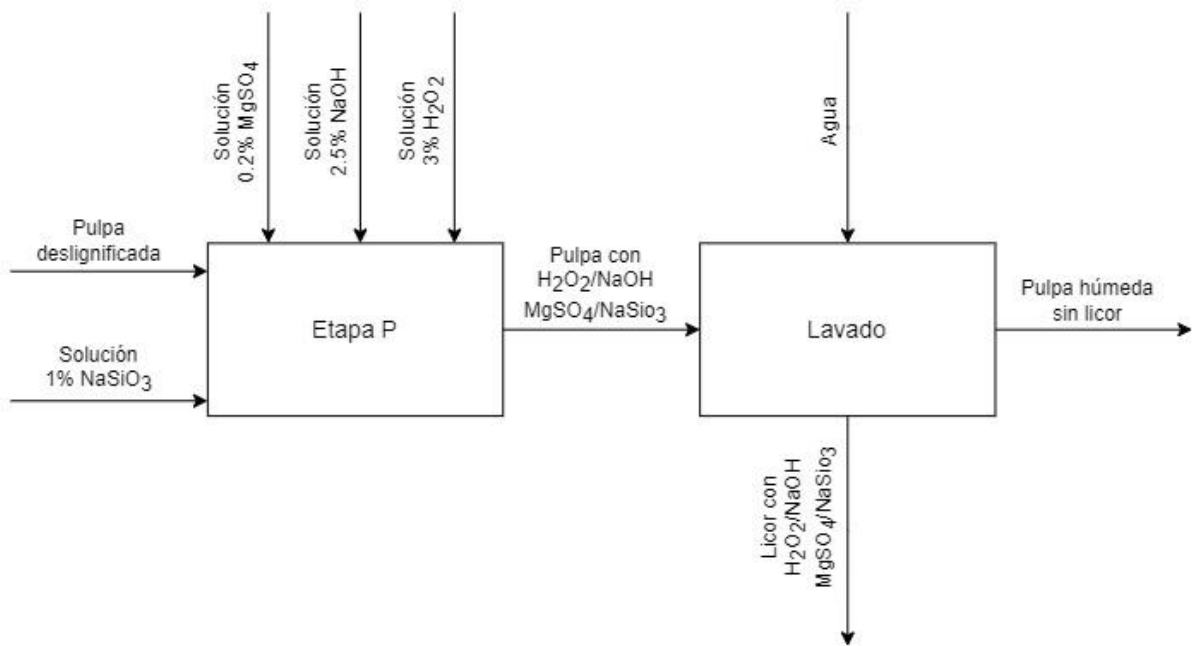
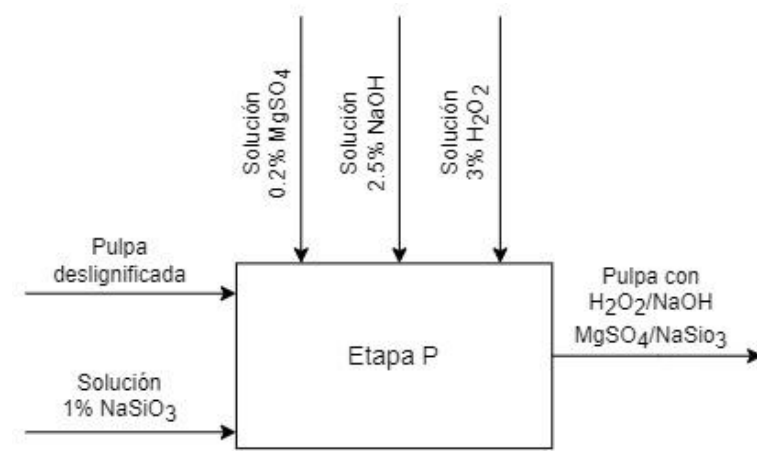


Figura 12. Diagrama de bloques del blanqueo de pulpa deslignificada con el método TCF



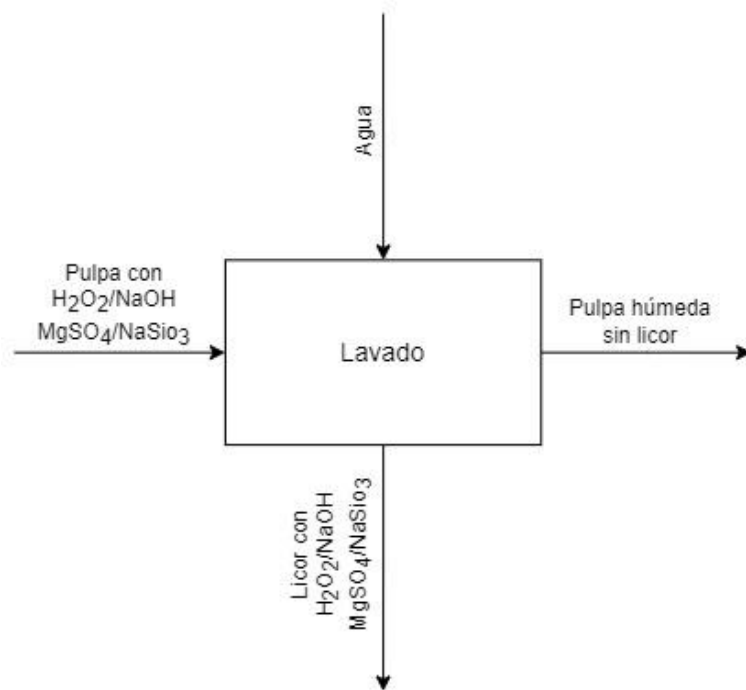
(Elaboración propia)

Figura 13. Flujos de entrada y salida de la etapa P del blanqueo con el método TCF



(Elaboración propia)

Figura 14. Flujos de entrada y salida del lavado del blanqueo con el método TCF

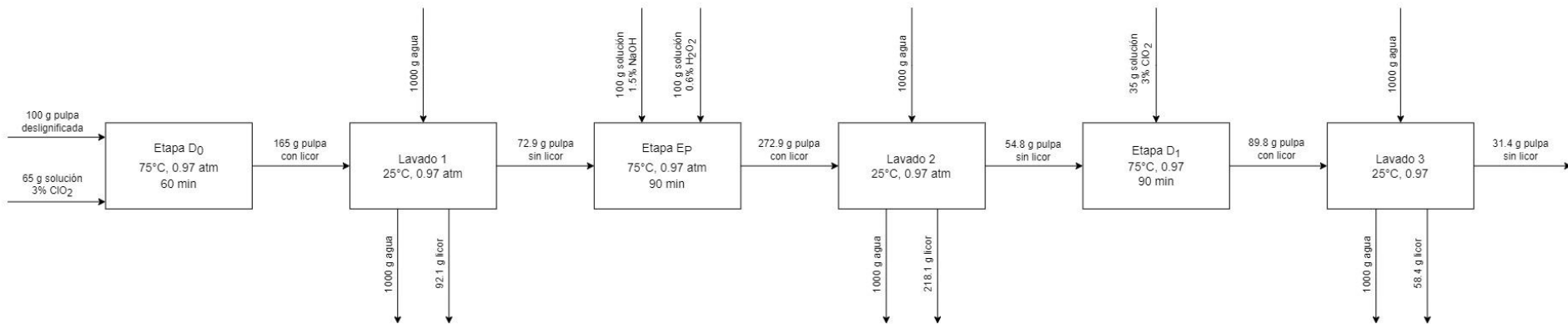


(Elaboración propia)



## B. BALANCE DE MASA

Figura 15. Balance de masa del blanqueo de 100 g de pulpa deslignificada con el método ECF

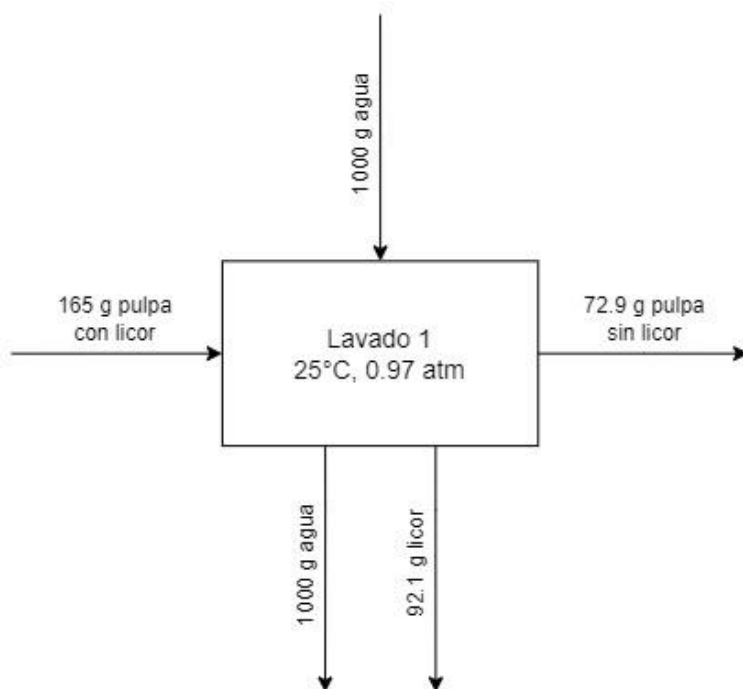


(Elaboración propia)

Figura 16. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa D<sub>0</sub> del blanqueo con el método ECF

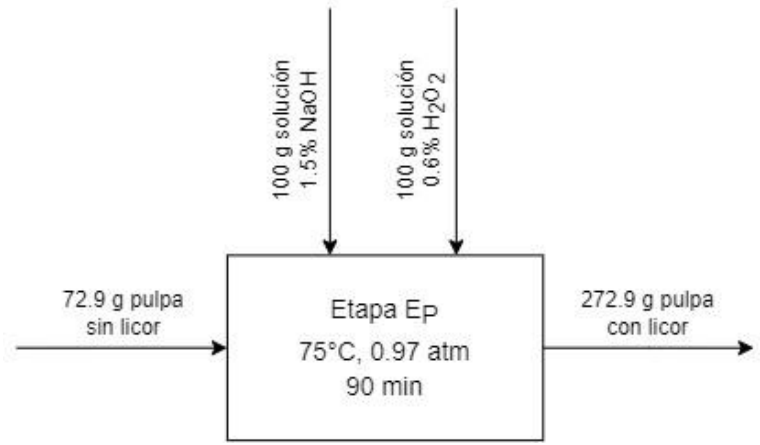


Figura 17. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 1 del blanqueo con el método ECF



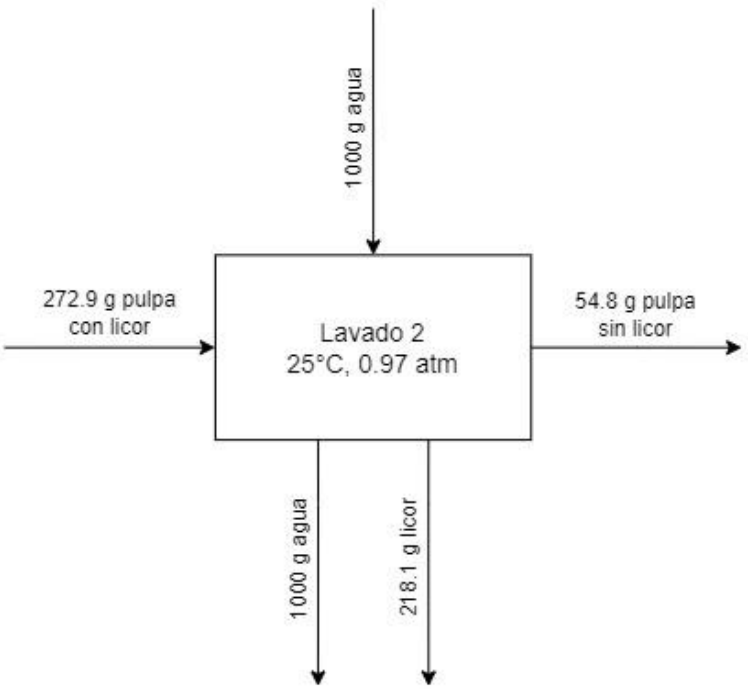
(Elaboración propia)

Figura 18. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa E<sub>p</sub> del blanqueo con el método ECF



(Elaboración propia)

Figura 19. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 2 del blanqueo con el método ECF



(Elaboración propia)

Figura 20. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa D<sub>1</sub> del blanqueo con el método ECF

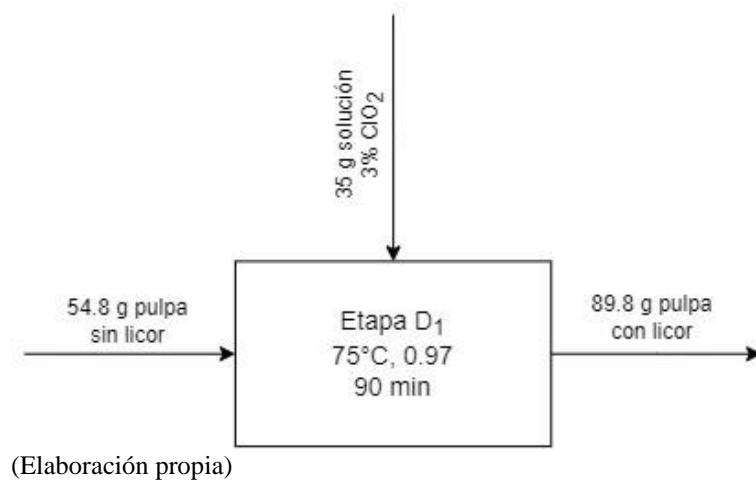


Figura 21. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado 3 del blanqueo con el método ECF

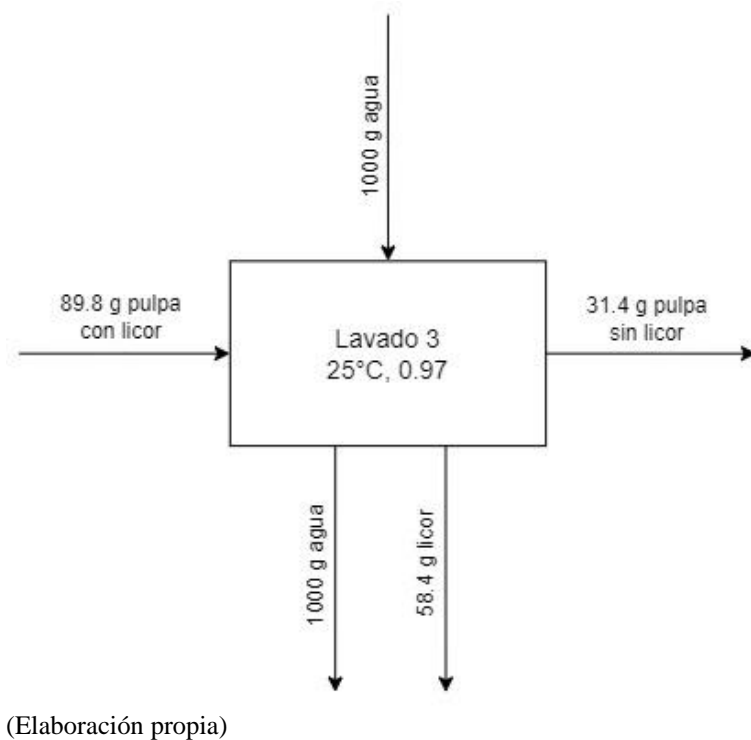
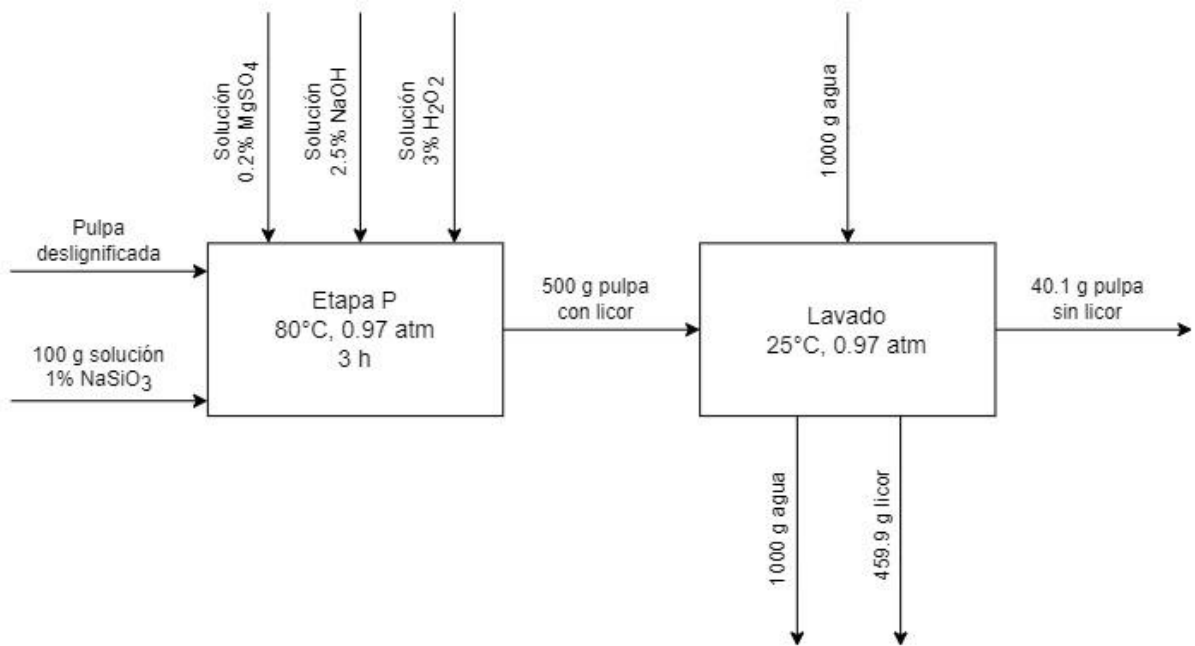
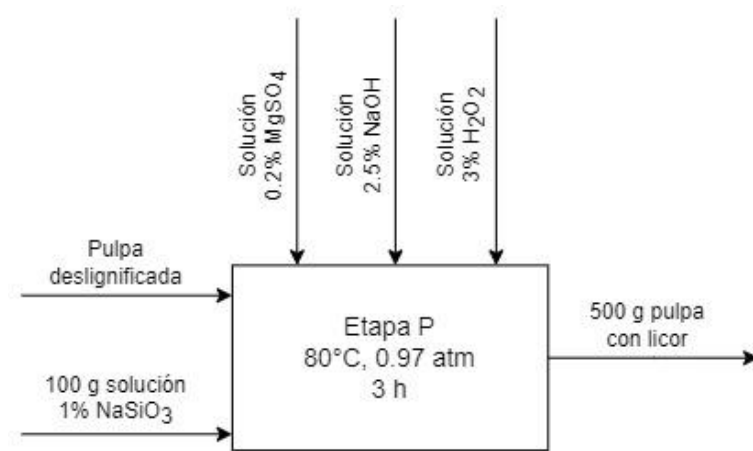


Figura 22. Balance de masa del blanqueo de 100 g de pulpa deslignificada con el método TCF



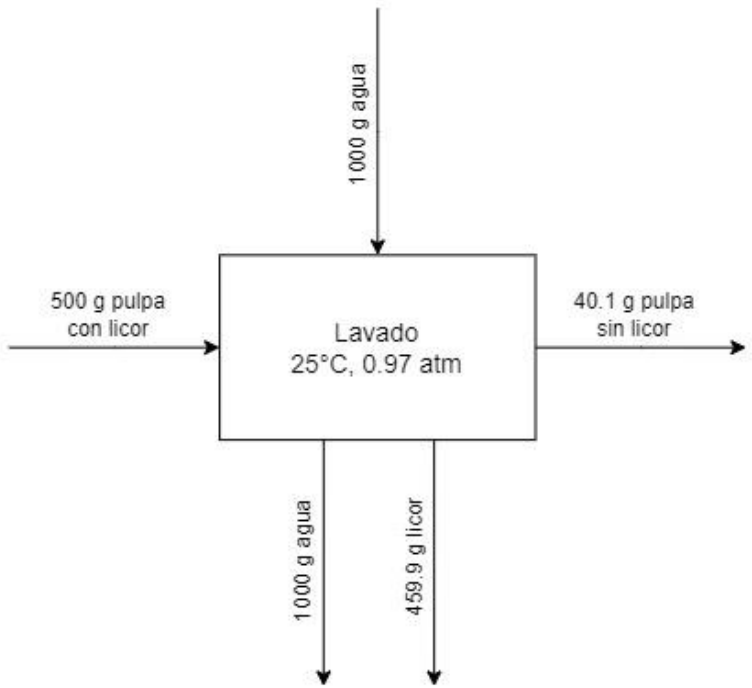
(Elaboración propia)

Figura 23. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa de la etapa P del blanqueo con el método TCF



(Elaboración propia)

Figura 24. Detalle de los flujos de entrada y salida del balance de masa del lavado del blanqueo con el método TCF



(Elaboración propia)

## C. DATOS DE PLACA

Cuadro 13. Especificaciones de espectrofotómetro UV/VIS

Característica	Detalle
Marca	PerkinElmer
Modelo	Lambda 35
Serie	101N2011603
Rango de longitud de onda	190 – 1100 nm
Rango de absorbancia	3.2A
Ancho de banda	1 nm (fijo)

Cuadro 14. Especificaciones de potenciómetro

Característica	Detalle
Marca	Oakton
Modelo	PCSTestr 35 Multi-Parameter
Serie	2564354
Rango de pH	0.00 – 14.00
Exactitud de pH	±0.01
Rango de temperatura	0 – 500 °C
Exactitud de temperatura	0.5 °C

Cuadro 15. Especificaciones de analizador de humedad

Característica	Detalle
Marca	Ohaus
Modelo	MB 120
Rango de humedad	0.01 – 100%
Rango de temperatura	40 – 230 °C
Legibilidad	0.01% / 0.001 g

Cuadro 16. Especificaciones de densitómetro

Característica	Detalle
Marca	X-Rite®
Modelo	eXact Basic
Rango espectral	400 – 700 nm

Cuadro 17. Especificaciones de estufa convencional

Característica	Detalle
Marca	Indurama
Modelo	Oviedo
Serie	E000734015000041126
Potencia de hornillas	1600 W

Cuadro 18. Especificaciones de mufla

Característica	Detalle
Marca	Thermolyne
Modelo	48000
Rango de temperatura	100 – 1200 °C

Cuadro 19. Especificaciones de horno para laboratorio

Característica	Detalle
Marca	Froilabo
Modelo	Air Expert AE 120
Número	506000
Rango de temperatura	100 – 250 °C

Cuadro 20. Especificaciones de microscopio

Característica	Detalle
Marca	Fisher Scientific
Modelo	Micromaster
Número de catálogo	1256320

Cuadro 21. Especificaciones de balanza semianalítica

Característica	Detalle
Marca	Ohaus
Modelo	Valor 3000 Xtreme
Incertidumbre	±0.1 g

Cuadro 22. Especificaciones de balanza analítica

Característica	Detalle
Marca	Ohaus
Modelo	Pioneer
Incertidumbre	±0.0001 g

Cuadro 23. Especificaciones de balanza industrial

Característica	Detalle
Marca	Ohaus
Modelo	3000 Series
Incertidumbre	±2 g



## D. DATOS ORIGINALES

Cuadro 24. Masa de pulpa durante el blanqueo con el método ECF

Etapa	Detalle	Masa (g)		
		8% NaOH 100 min (±0.1 g)	14% NaOH 60 min (±2 g)	14% NaOH 100 min (±2 g)
D <sub>0</sub>	Pulpa deslignificada inicial	100.0	1600	1300
	Pulpa con soluciones	165.0	2675	2160
	Pulpa blanqueada sin licor	72.9	900	1080
E <sub>P</sub>	Pulpa con soluciones	272.9	4100	3680
	Pulpa blanqueada sin licor	54.8	780	1200
D <sub>1</sub>	Pulpa con soluciones	89.8	1400	1700
	Pulpa blanqueada sin licor	31.4	720	1220

Nota 1: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 25. Masa de pulpa durante el blanqueo con el método TCF

Etapa	Detalle	Masa (g)		
		8% NaOH 100 min (±0.1 g)	14% NaOH 60 min (±2 g)	14% NaOH 100 min (±2 g)
P	Pulpa deslignificada inicial	100.0	1560	1300
	Pulpa con soluciones	500.0	7580	6500
	Pulpa blanqueada sin licor	40.1	1020	820

Nota 1: etapa P correspondiente a peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 26. Absorbancia para determinar el número Kappa de pulpa blanqueada con el método ECF

Muestra	Masa (±0.00001 g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)		
		A	B	C	A	B	C
8% NaOH 100 min	0.10297	1.1556	1.1087	1.1350	0.4872	0.5441	0.5203
8% NaOH 130 min	0.10652	1.1720	1.1693	1.1824	0.2001	0.2029	0.1899
8% NaOH 150 min	0.10801	1.2182	1.2906	1.1848	0.2669	0.1946	0.1597
10% NaOH 100 min	0.10057	1.1245	1.1437	1.1721	0.3914	0.3722	0.3501
10% NaOH 130 min	0.10343	1.0622	1.1180	1.1615	0.3961	0.3402	0.3187

Nota 1: mediciones efectuadas con un espectrofotómetro UV/VIS PerkinElmer Lambda 35.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 27. Absorbancia para determinar el número Kappa de pulpa blanqueada con el método TCF

Muestra	Masa ( $\pm 0.00001$ g)	Absorbancia inicial (0 min)			Absorbancia final (10 min)		
		A	B	C	A	B	C
8% NaOH 100 min	0.11060	1.0457	1.0179	1.0025	0.3207	0.4009	0.3074
8% NaOH 130 min	0.10048	1.1996	1.1649	1.1668	0.1541	0.1071	0.1011
8% NaOH 150 min	0.10502	1.2619	1.2531	1.2413	0.2075	0.1251	0.1533
10% NaOH 100 min	0.10448	1.1345	1.1143	1.1116	0.2824	0.2095	0.2310
10% NaOH 130 min	0.10109	1.0932	1.0872	1.0808	0.2762	0.2197	0.2774

Nota 1: mediciones efectuadas con un espectrofotómetro UV/VIS PerkinElmer Lambda 35.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 28. pH de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	8% NaOH 100 min		8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min	
	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)
Original	11.02	24.7	9.50	23.6	11.00	24.8
ECF	9.48	24.2	8.77	23.7	9.35	24.2
TCF	8.63	23.2	8.63	23.6	8.85	23.2

Nota: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 29. pH del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

Etapa	8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min		14% NaOH 100 min	
	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)
D <sub>0</sub>	9.48	19.1	9.41	19.3	10.51	22.4
E <sub>P</sub>	12.39	18.8	12.4	19.0	12.59	22.3
D <sub>1</sub>	8.91	19.2	9.78	19.2	11.62	22.6

Nota 1: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 30. pH del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

Etapa	8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min		14% NaOH 100 min	
	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T ( $^{\circ}$ C)
P	12.38	18.9	12.37	18.8	12.54	22.4

Nota 1: etapa P correspondiente a peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 31. Masa y volumen de etanol desplazado de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Muestra	8% NaOH 100 min		
	Original	ECF	TCF
Masa ( $\pm 0.0001$ g)	4.3646	4.6944	4.2108
Volumen EtOH ( $\pm 0.1$ mL)	4.5	4.8	4.5

Nota: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 32. Contenido de humedad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Original	ECF	TCF
Muestra	Contenido de humedad ( $\pm 0.01\%$ MC)		
8% NaOH 100 min	90.66	88.77	88.07
8% NaOH 130 min	88.89	90.38	88.03
8% NaOH 150 min	89.51	88.16	89.37
10% NaOH 100 min	89.29	86.86	90.41
10% NaOH 130 min	87.61	87.59	84.25
10% NaOH 150 min	90.48	87.03	87.28
12% NaOH 100 min	90.11	89.01	87.59
12% NaOH 130 min	88.71	89.22	88.41

Nota 1: mediciones efectuadas con un analizador de humedad Ohaus MB120.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 33. Código Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Pantone®
Original	725 U
ECF	468 U
TCF	7499 U

Nota 1: mediciones efectuadas con una carta de colores Pantone® sin barniz, con luz natural.

Nota 2: U (Uncoated).

Cuadro 34. Parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB

Muestra	Luminosidad (L*)	Valor rojo/verde (a*)	Valor azul/amarillo (b*)	Reflectividad
Papel periódico	90.00	0.20	-4.50	25%
8% NaOH 100 min	77.10	-1.30	12.35	19%
8% NaOH 130 min	77.40	-1.41	12.88	19%
8% NaOH 150 min	75.70	2.19	21.76	17%
10% NaOH 100 min	77.30	-0.92	11.97	19%
10% NaOH 130 min	78.70	0.35	10.31	20%
10% NaOH 150 min	76.22	1.99	19.45	17%
12% NaOH 100 min	76.80	-1.48	12.46	19%
12% NaOH 130 min	78.10	0.72	10.87	19%
14% NaOH 130 min	77.90	-0.49	14.68	19%

Nota 1: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 35. Parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB

Muestra	Luminosidad (L*)	Valor rojo/verde (a*)	Valor azul/amarillo (b*)	Reflectividad
Papel periódico	90.00	0.20	-4.50	25%
8% NaOH 100 min	80.40	-1.72	9.33	20%
8% NaOH 130 min	81.30	-0.79	8.51	21%
8% NaOH 150 min	79.60	-2.01	11.75	20%
10% NaOH 100 min	79.90	-0.91	8.93	21%
10% NaOH 130 min	81.80	-0.22	8.11	21%
10% NaOH 150 min	78.80	-1.73	10.98	20%
12% NaOH 100 min	81.20	0.94	8.59	21%
12% NaOH 130 min	81.40	0.54	9.01	21%
14% NaOH 130 min	78.9	1.78	12.44	20%

Nota 1: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 36. Masa de cloruro de potasio para estandarizar la solución de nitrato de plata para la determinación de cloruros

Muestra	Masa KCl ( $\pm 0.0001$ g)	Volumen AgNO <sub>3</sub> ( $\pm 0.1$ mL)
Blanco	0.0000	0.1
1	0.0146	2.3
2	0.0146	2.4

Cuadro 37. Volumen de la solución de nitrato de plata para la determinación de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

Etapa	Muestra	Volumen AgNO <sub>3</sub> (±0.1 mL)
D <sub>0</sub>	1	6.5
	2	6.1
	3	6.3
	4	6.2
E <sub>P</sub>	1	0.0
	2	0.0
	3	0.0
	4	0.0
D <sub>1</sub>	1	4.2
	2	4.4
	3	5.7
	4	5.7

Nota 1: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Nota 2: el licor de la etapa E<sub>P</sub> se tornó de color verde musgo/gris al reaccionar con el indicador de cromato de potasio. Se concluye que no hay presencia de cloruros.

Cuadro 38. Masa de crisoles para la determinación de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

Muestra	Masa crisol (±0.0001 g)	Masa tapa (±0.0001 g)	Masa crisol con muestra (±0.0001 g)
1	20.0189	15.6738	20.0721
2	16.3650	17.1312	16.3744
3	29.2210	20.9093	29.2310
4	19.8825	22.1010	19.8959
5	19.8556	15.9027	19.8686
6	20.8130	18.5549	20.8239

Cuadro 39. Volumen de la solución de ácido clorhídrico para la determinación de sodio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Muestra	Volumen HCl (±0.1 mL)
ECF	1	20.6
	2	20.5
TCF	1	25.2
	2	25.5

## E. DATOS CALCULADOS

Cuadro 40. Promedio del número Kappa de pulpa blanqueada con el método ECF

Muestra	Masa ( $\pm 0.00001$ g)	Absorbancia (0 min)			Absorbancia (10 min)			Número Kappa			Promedio NK
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8% NaOH 100 min	0.10297	1.1556	1.1087	1.1350	0.4872	0.5441	0.5203	28.84	26.54	27.50	27.63
8% NaOH 130 min	0.10652	1.1720	1.1693	1.1824	0.2001	0.2029	0.1899	39.11	39.00	39.51	39.21
8% NaOH 150 min	0.10801	1.2182	1.2906	1.1848	0.2669	0.1946	0.1597	36.00	38.78	40.13	38.30
10%NaOH 100 min	0.10057	1.1245	1.1437	1.1721	0.3914	0.3722	0.3501	33.50	34.30	35.21	34.34
10%NaOH 130 min	0.10343	1.0622	1.1180	1.1615	0.3961	0.3402	0.3187	32.39	34.64	35.50	34.18
Nota 1: mediciones efectuadas con un espectrofotómetro UV/VIS PerkinElmer Lambda 35.											34.73 $\pm$ 4.57

Nota 2: se realizó un triplicado de la absorbancia para la misma muestra de pulpa.

Nota 3: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 41. Promedio del número Kappa de pulpa blanqueada con el método TCF

Muestra	Masa ( $\pm 0.00001$ g)	Absorbancia (0 min)			Absorbancia (10 min)			Número Kappa			Promedio NK
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
8% NaOH 100 min	0.11060	1.0457	1.0179	1.0025	0.3207	0.4009	0.3074	33.13	30.10	33.63	32.29
8% NaOH 130 min	0.10048	1.1996	1.1649	1.1668	0.1541	0.1071	0.1011	43.37	45.32	45.57	44.75
8% NaOH 150 min	0.10502	1.2619	1.2531	1.2413	0.2075	0.1251	0.1533	39.38	42.65	41.53	41.18
10%NaOH 100 min	0.10448	1.1345	1.1143	1.1116	0.2824	0.2095	0.2310	36.59	39.50	38.64	38.25
10%NaOH 130 min	0.10109	1.0932	1.0872	1.0808	0.2762	0.2197	0.2774	38.08	40.41	38.03	38.84
Nota: mediciones efectuadas con un espectrofotómetro UV/VIS PerkinElmer Lambda 35.											39.06 $\pm$ 4.57

Nota 2: se realizó un triplicado de la absorbancia para la misma muestra de pulpa.

Nota 3: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 42. Promedio del pH de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	8% NaOH 100 min		8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min		Promedio pH	Promedio T (°C)
	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)		
Original	11.02	24.7	9.50	23.6	11.00	24.8	10.51 $\pm$ 0.87	24.4 $\pm$ 0.67
ECF	9.48	24.2	8.77	23.7	9.35	24.2	9.20 $\pm$ 0.38	24.0 $\pm$ 0.29
TCF	8.63	23.2	8.63	23.6	8.85	23.2	8.70 $\pm$ 0.13	23.3 $\pm$ 0.23

Nota: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 43. Promedio del pH del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

Método	8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min		14% NaOH 100 min		Promedio pH	Promedio T (°C)
	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)		
D <sub>0</sub>	9.48	19.1	9.41	19.3	10.51	22.4	9.80 $\pm$ 0.62	20.3 $\pm$ 1.85
E <sub>P</sub>	12.39	18.8	12.4	19.0	12.59	22.3	12.46 $\pm$ 0.11	20.0 $\pm$ 1.97
D <sub>1</sub>	8.91	19.2	9.78	19.2	11.62	22.6	10.10 $\pm$ 1.38	20.3 $\pm$ 1.96

Nota 1: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 44. Promedio del pH del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

Método	8% NaOH 100 min		10% NaOH 100 min		14% NaOH 100 min		Promedio pH	Promedio T (°C)
	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)	pH ( $\pm 0.01$ )	T (°C)		
P	12.38	18.9	12.37	18.8	12.54	22.4	12.43 $\pm$ 0.10	20.0 $\pm$ 2.05

Nota 1: etapa P correspondiente a peróxido de hidrógeno.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 45. Densidad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Muestra	8% NaOH 100 min		
Método	Original	ECF	TCF
Masa ( $\pm 0.0001$ g)	4.3646	4.6944	4.2108
Volumen EtOH ( $\pm 0.1$ mL)	4.5	4.8	4.5
Densidad ( $\pm 0.022$ g/mL)	0.970	0.978	0.936

Nota: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 46. Promedio del contenido de humedad de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Original	ECF	TCF
Muestra	Contenido de humedad ( $\pm 0.01$ %MC)		
8% 100 min	90.66	88.77	88.07
8% 130 min	88.89	90.38	88.03
8% 150 min	89.51	88.16	89.37
10% 100 min	89.29	86.86	90.41
10% 130 min	87.61	87.59	84.25
10% 150 min	90.48	87.03	87.28
12% 100 min	90.11	89.01	87.59
12% 130 min	88.71	89.22	88.41
Promedio (%MC)	89.41	88.38	87.93
Desviación estándar	1.02	1.20	1.80

Nota 1: mediciones efectuadas con un analizador de humedad Ohaus MB120.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 47. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método ECF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB

Muestra	Luminosidad (L*)	Valor rojo/verde (a*)	Valor azul/amarillo (b*)	Reflectividad
8% NaOH 100 min	77.10	-1.30	12.35	19%
8% NaOH 130 min	77.40	-1.41	12.88	19%
8% NaOH 150 min	75.70	2.19	21.76	17%
10% NaOH 100 min	77.30	-0.92	11.97	19%
10% NaOH 130 min	78.70	0.35	10.31	20%
10% NaOH 150 min	76.22	1.99	19.45	17%
12% NaOH 100 min	76.80	-1.48	12.46	19%
12% NaOH 130 min	78.10	0.72	10.87	19%
14% NaOH 130 min	77.90	-0.49	14.68	19%
Promedio	77.25	-0.04	14.08	18.67%
Desviación estándar	0.93	1.43	3.94	1.00%

Nota 1: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.



Cuadro 48. Promedio de parámetros de luminosidad, valor rojo/verde, valor azul/amarillo y reflectividad de pulpa blanqueada con el método TCF de acuerdo con el modelo cromático CIELAB

Muestra	Luminosidad (L*)	Valor rojo/verde (a*)	Valor azul/amarillo (b*)	Reflectividad
8% NaOH 100 min	80.40	-1.72	9.33	20%
8% NaOH 130 min	81.30	-0.79	8.51	21%
8% NaOH 150 min	79.60	-2.01	11.75	20%
10% NaOH 100 min	79.90	-0.91	8.93	21%
10% NaOH 130 min	81.80	-0.22	8.11	21%
10% NaOH 150 min	78.80	-1.73	10.98	20%
12% NaOH 100 min	81.20	0.94	8.59	21%
12% NaOH 130 min	81.40	0.54	9.01	21%
14% NaOH 130 min	78.90	1.78	12.44	20%
Promedio	80.37	-0.46	9.74	20.56%
Desviación estándar	1.12	1.32	1.57	0.53%

Nota 1: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Cuadro 49. Concentración de la solución estandarizada de nitrato de plata para la determinación de cloruros

Muestra	Masa KCl ( $\pm 0.0001$ g)	Volumen AgNO <sub>3</sub> ( $\pm 0.1$ mL)	Concentración AgNO <sub>3</sub> (M)
Blanco	0.0000	0.1	-
1	0.0146	2.3	8.1595E-02
2	0.0146	2.4	7.8331E-02
		Promedio	7.9963E-02

Cuadro 50. Concentración de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

Etapa	Muestra	Volumen AgNO <sub>3</sub> (±0.1 mL)	Mol ClO <sub>2</sub>	Concentración ClO <sub>2</sub> (M)
D <sub>0</sub>	1	6.5	0.00052	0.0520
	2	6.1	0.00049	0.0488
	3	6.3	0.00050	0.0504
	4	6.2	0.00050	0.0496
D <sub>1</sub>	1	4.2	0.00034	0.0336
	2	4.4	0.00035	0.0352
	3	5.7	0.00046	0.0456
	4	5.7	0.00046	0.0456
Concentración promedio ClO <sub>2</sub> (M)				0.0451
Desviación estándar				0.0070
Concentración de cloruros (Cl <sup>-</sup> ) (mg/L)				1598.20

Nota 1: etapa D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub> correspondiente a dióxido de cloro; etapa E<sub>P</sub> correspondiente a hidróxido de sodio con peróxido de hidrógeno.

Nota 2: el licor de la etapa E<sub>P</sub> se tornó de color verde musgo/gris al reaccionar con el indicador de cromato de potasio. No se tomó en cuenta para la determinación de la concentración de cloruros.

Cuadro 51. Concentración de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

Muestra	Masa crisol (±0.0001 g)	Masa tapa (±0.0001 g)	Masa crisol con muestra (±0.0001 g)	Masa muestra neta (±0.00001 g)	Masa MgSO <sub>4</sub> (g)
1	20.0189	15.6738	20.0721	0.0532	0.0274
2	16.3650	17.1312	16.3744	0.0094	0.0048
3	29.2210	20.9093	29.2310	0.0100	0.0052
4	19.8825	22.1010	19.8959	0.0134	0.0069
5	19.8556	15.9027	19.8686	0.0130	0.0067
6	20.8130	18.5549	20.8239	0.0109	0.0056
Masa promedio MgSO <sub>4</sub> (g)					0.0094
Desviación estándar					0.0089
Concentración de sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ) (mg/L)					301.54

Cuadro 52. Masa de sodio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF

Método	Muestra	Volumen HCl (±0.1 mL)	Masa Na <sup>+</sup> (g)	Promedio (g)
ECF	1	20.6	0.1184	0.1181
	2	20.5	0.1178	
TCF	1	25.2	0.1448	0.1457
	2	25.5	0.1466	

Cuadro 53. Costo variable de reactivos y servicios para el blanqueo de 1 kg de pulpa con el método ECF

Descripción	Costo (Q/kg)
Dióxido de cloro	14.60
Hidróxido de sodio	0.29
Peróxido de hidrógeno	0.12
Bolsa plástica para 5 kg	6.60
Cargo unitario por energía eléctrica	1.43
Cargo por consumo de agua potable	0.08
Total costo variable	23.12
	2.99 USD/kg

Cuadro 54. Costo variable de reactivos y servicios para el blanqueo de 1 kg de pulpa con el método TCF

Descripción	Costo (Q/kg)
Hidróxido de sodio	0.55
Peróxido de hidrógeno	0.68
Sulfato de magnesio	0.02
Silicato de sodio	0.16
Bolsa plástica para 5 kg	2.20
Cargo unitario por energía eléctrica	1.07
Cargo por consumo de agua potable	0.09
Total costo variable	4.77
	0.62 USD/kg

## F. CÁLCULO DE MUESTRA

Cálculo 1. Número Kappa de pulpa blanqueada con el método ECF

$$K = \frac{a}{w} \left(1 - \frac{A_e}{A_0}\right) = \frac{5 \text{ mL}}{0.10297 \text{ g}} \left(1 - \frac{0.4872}{1.2}\right) = 28.84$$

Donde:

$K$  = número Kappa de pulpa blanqueada

$a$  = volumen inicial de la solución 0.02 M de permanganato de potasio en la solución blanco (mL)

$w$  = masa de la muestra de pulpa blanqueada seca (g)

$A_0$  = absorbancia de la solución de permanganato de potasio inicial a 553 nm, a los 0 minutos de la reacción de oxidación

$A_e$  = absorbancia de la solución de permanganato de potasio final a 553 nm, a los 10 minutos de la reacción de oxidación

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de pulpa deslignificada al 8%, 10% (m/m) durante 100, 130, 150 minutos y blanqueada con el método ECF y TCF.

Cálculo 2. Densidad de pulpa blanqueada con el método ECF

$$\rho = \frac{m_{mx}}{V_{EtOH}} = \frac{4.6944 \text{ g}}{4.8 \text{ mL}} = 0.978 \text{ g/mL}$$

Donde:

$\rho$  = densidad de pulpa blanqueada (g/mL)

$m_{mx}$  = masa de pulpa blanqueada (g)

$V_{EtOH}$  = volumen de etanol desplazado por la muestra de pulpa

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de pulpa deslignificada al 8% (m/m) durante 100 minutos y blanqueada con el método TCF.

Cálculo 3. Estandarización de la concentración de la solución de nitrato de plata para la determinación de cloruros en el licor ECF

$$[AgNO_3] = \frac{m_{KCl}}{PM_{KCl} * V_{AgNO_3}} = 0.0146 \text{ g} * \frac{1 \text{ mol}}{74.555 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{2.3 + 0.1 \text{ mL}} = 8.1595E^{-02} M$$

Donde:

$[AgNO_3]$  = concentración estandarizada de la solución de nitrato de plata (M)

$m_{KCl}$  = masa de cloruro de potasio (g)

$PM_{KCl}$  = peso molecular de cloruro de potasio (g/mol)

$V_{AgNO_3}$  = volumen de la solución de nitrato de plata empleado en la valoración (L)

Cálculo 4. Concentración de dióxido de cloro del licor de pulpa blanqueada con el método ECF

$$[ClO_2] = \frac{[AgNO_3] * V_{AgNO_3}}{V_{mx}} = 7.9963E^{-02} M * \frac{6.5 mL}{10 mL} = 0.0520 M$$

Donde:

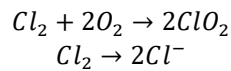
$[AgNO_3]$  = concentración estandarizada promedio de la solución de nitrato de plata (M)

$V_{AgNO_3}$  = volumen de la solución de nitrato de plata empleado en la valoración (mL)

$V_{mx}$  = volumen de la muestra de licor (mL)

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de licor de pulpa blanqueada con el método ECF.

Cálculo 5. Concentración de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF



$$\frac{0.0451 \text{ mol } ClO_2}{1 L} * \frac{1 \text{ mol } Cl_2}{2 \text{ mol } ClO_2} * \frac{2 \text{ mol } Cl^-}{1 \text{ mol } Cl_2} * \frac{35.453 \text{ g } Cl^-}{1 \text{ mol } Cl^-} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 1598.20 \text{ mg/L } Cl^-$$

Se realizó el cálculo a partir de la concentración de dióxido de cloro promedio.

Cálculo 6. Masa de muestra calcinada para la determinación de sulfatos en el licor TCF

$$m_{mx \text{ BaSO}_4} = m_{\text{crisol}+mx} - m_{\text{crisol}} = 20.0189 \text{ g} - 20.0721 \text{ g} = 0.0532 \text{ g}$$

Donde:

$m_{mx \text{ BaSO}_4}$  = masa de muestra calcinada de licor como sulfato de bario (g)

$m_{\text{crisol}+mx}$  = masa de crisol con la muestra calcinada de licor (g)

$m_{\text{crisol}}$  = masa de crisol (g)

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de licor de pulpa blanqueada con el método TCF.

Cálculo 7. Masa de sulfato de magnesio del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

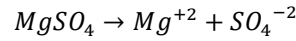
$$X \text{ g } MgSO_4 * \frac{1 \text{ mol } MgSO_4}{120.366 \text{ g } MgSO_4} * \frac{1 \text{ mol } BaSO_4}{1 \text{ mol } MgSO_4} * \frac{233.4016 \text{ g } BaSO_4}{1 \text{ mol } BaSO_4} = 1.9391X \text{ g } BaSO_4$$

$$1.9391X \text{ g } BaSO_4 = 0.0532 \text{ g } BaSO_4$$

$$X = \frac{0.0532 \text{ g } BaSO_4}{1.9391 \text{ g } BaSO_4} = 0.0274 \text{ g } MgSO_4$$

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de licor de pulpa blanqueada con el método TCF.

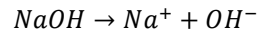
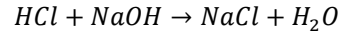
Cálculo 8. Concentración de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF



$$\frac{0.0094 \text{ g } MgSO_4}{25 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ mol } MgSO_4}{120.366 \text{ g } MgSO_4} * \frac{1 \text{ mol } SO_4^{-2}}{1 \text{ mol } MgSO_4} * \frac{96.06 \text{ g } SO_4^{-2}}{1 \text{ mol } SO_4^{-2}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 301.54 \text{ mg/L } SO_4^{-2}$$

Se realizó el cálculo a partir de la masa de sulfato de magnesio promedio y el volumen de la muestra de licor.

Cálculo 9. Masa de sodio del licor de pulpa blanqueada con el método ECF



$$20.6 \text{ mL } HCl * \frac{0.25 \text{ mol } HCl}{1000 \text{ mL } HCl} * \frac{1 \text{ mol } NaOH}{1 \text{ mol } HCl} * \frac{1 \text{ mol } Na^+}{1 \text{ mol } NaOH} * \frac{22.99 \text{ g } Na^+}{1 \text{ mol } Na^+} = 0.1184 \text{ g } Na^+$$

Se realizó el mismo cálculo para las demás muestras de licor de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF, a partir del volumen de ácido clorhídrico empleado en la valoración y su concentración (0.25 M).

Cálculo 10. Costo variable de 1 kg de pulpa blanqueada con el método ECF

$$\text{Costo reactivos consumidos} + \text{Costo servicios consumidos} = \text{Costo variable}$$

$$\text{Costo } ClO_2 + \text{Costo } NaOH + \text{Costo } H_2O_2 + \text{Costo bolsa} + \text{Cargo EE} + \text{Cargo } H_2O = \text{Costo variable}$$

$$Q14.60 + Q0.29 + Q0.12 + Q6.60 + Q1.43 + Q0.08 = Q23.12$$

Se realizó el cálculo a partir del costo de los reactivos y servicios consumidos por 1 kg de pulpa. Asimismo, se realizó el mismo cálculo para el costo variable de 1 kg de pulpa blanqueada con el método TCF.

## G. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 11. Promedio aritmético del pH de pulpa blanqueada con el método ECF

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{11.02 + 9.50 + 11.00}{3} = 10.51$$

Donde:

$\bar{x}$  = promedio aritmético

$\sum_{i=1}^n x_i$  = sumatoria de datos

$n$  = número total de datos

Se realizó el mismo cálculo para todas las operaciones y resultados que involucran un promedio aritmético.

Cálculo 12. Desviación estándar del pH de pulpa blanqueada con el método ECF

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(11.02 - 10.51)^2 + (9.50 - 10.51)^2 + (11.00 - 10.51)^2}{3}} = \pm 0.87$$

Donde:

$\sigma$  = desviación estándar

$\bar{x}$  = promedio aritmético

$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  = sumatoria de desviaciones de cada dato con respecto al promedio elevadas al cuadrado

$n$  = número total de datos

Se realizó el mismo cálculo para todas las operaciones y resultados que involucran una desviación estándar.

## J. IMÁGENES ADICIONALES

Figura 25. Muestra de pulpa deslignificada en solución de permanganato de potasio y ácido sulfúrico para determinar el número Kappa



Nota: proceso realizado a escala laboratorio, a 22°C y 0.97 atm.  
(Imagen propia)

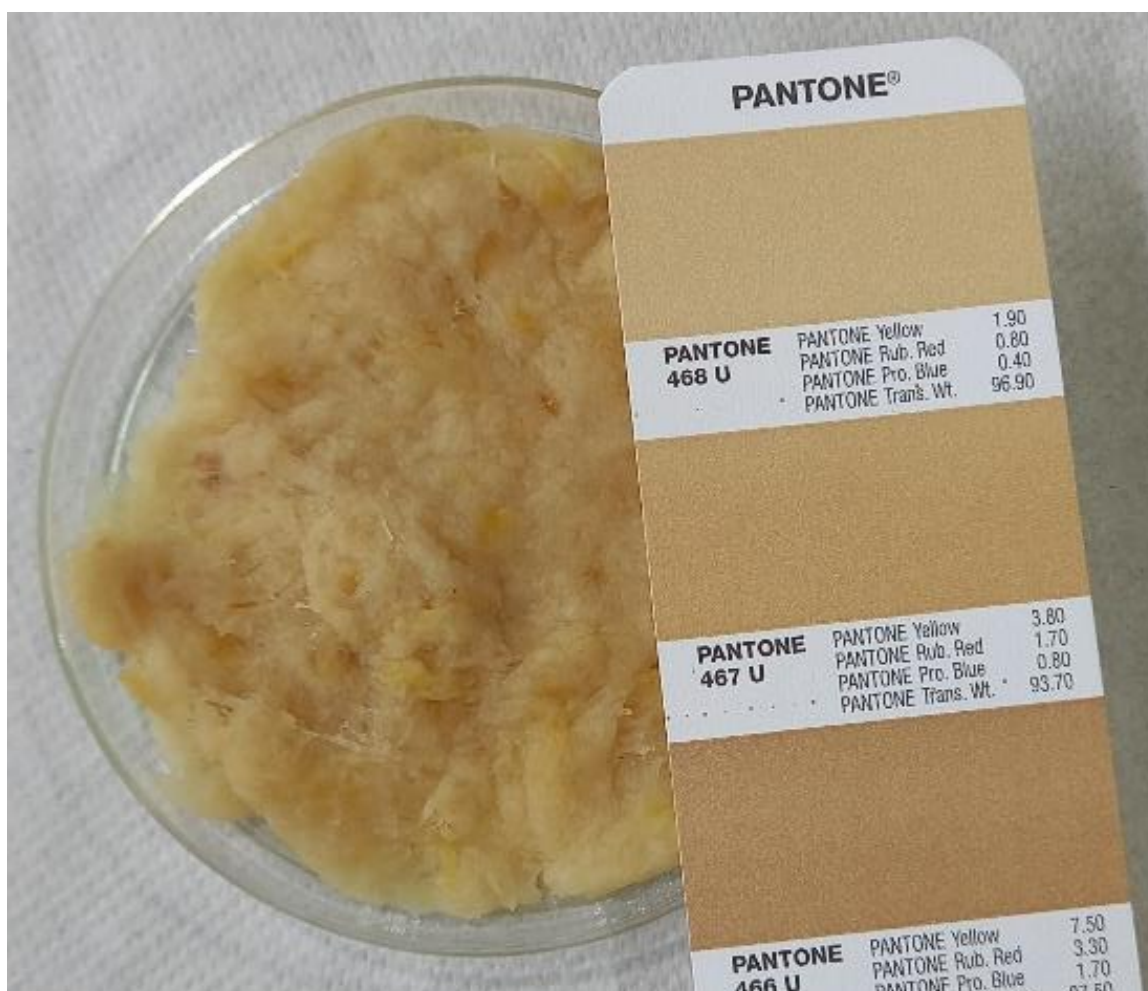


Figura 26. Color Pantone® de pulpa deslignificada



Nota: medición efectuada con una carta de colores Pantone® sin barniz, con luz natural a 25°C y 0.97 atm, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.  
(Imagen propia)

Figura 27. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método ECF



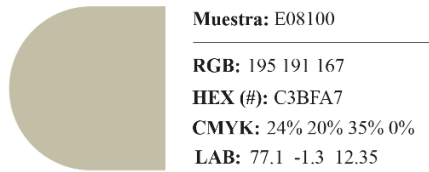
Nota: medición efectuada con una carta de colores Pantone® sin barniz, con luz natural a 25°C y 0.97 atm, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. (Imagen propia)

Figura 28. Color Pantone® de pulpa blanqueada con el método TCF



Nota: medición efectuada con una carta de colores Pantone® sin barniz, con luz natural a 25°C y 0.97 atm, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. (Imagen propia)

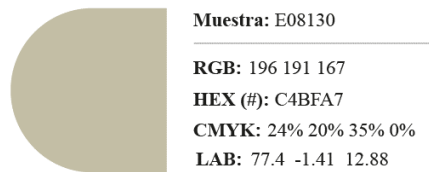
Figura 29. Coordenadas de color del modelo cromático RGB, HEX, CMYK y CIELAB de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF



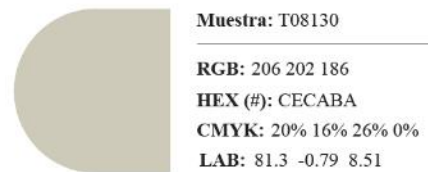
(a) ECF 8% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



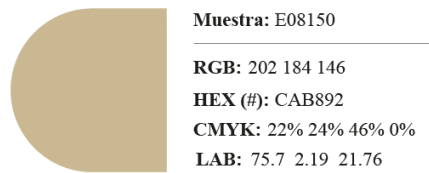
(b) TCF 8% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



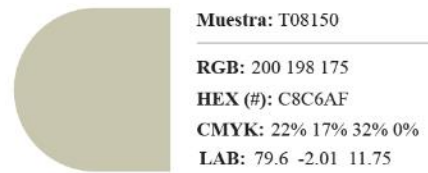
(c) ECF 8% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



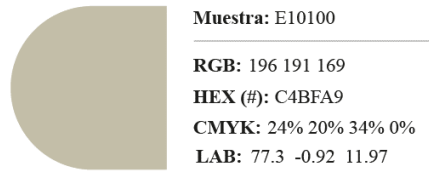
(d) TCF 8% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



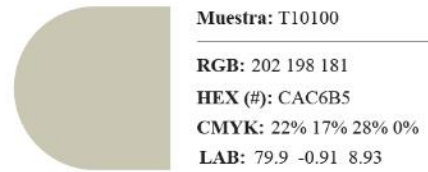
(e) ECF 8% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



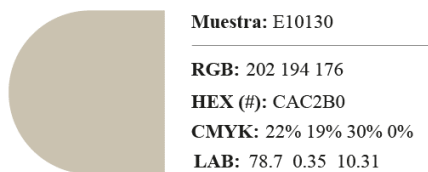
(f) TCF 8% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



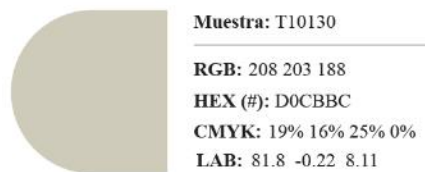
(g) ECF 10% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



(h) TCF 10% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



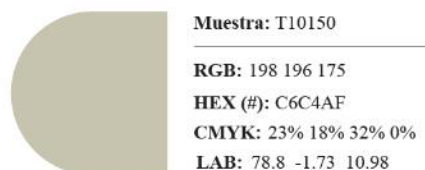
(i) ECF 10% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



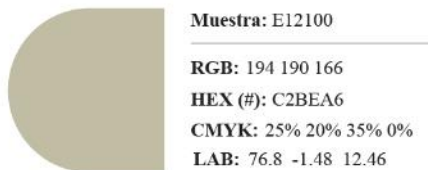
(j) TCF 10% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



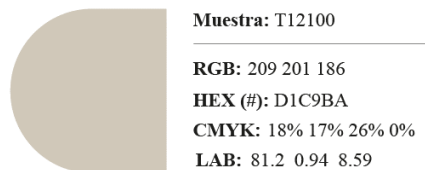
(k) ECF 10% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



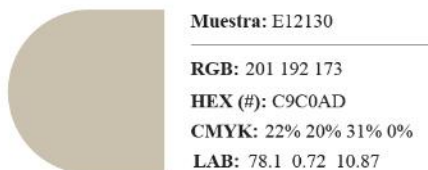
(l) TCF 10% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



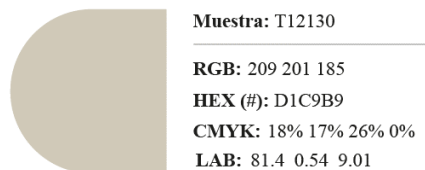
(m) ECF 12% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



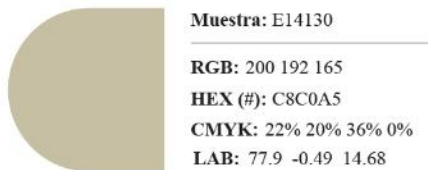
(n) TCF 12% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



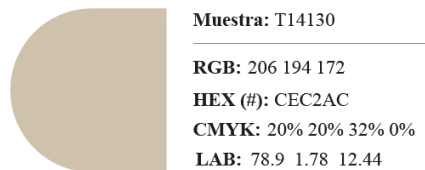
(o) ECF 12% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



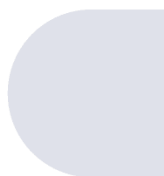
(p) TCF 12% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



(q) ECF 14% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



(r) TCF 14% NaOH 130 min  
(Imagen propia)



**Muestra:** Papel Periódico

**RGB:** 224 226 235

**HEX (#):** E0E2EB

**CMYK:** 11% 7% 3% 0%

**LAB:** 90 1.78 -4.5

(s) Papel periódico

(Imagen propia)

Nota 1: mediciones efectuadas con un densitómetro X-Rite® eXact Basic con luz D50.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Figura 30. Valoración de cloruros del licor de pulpa blanqueada con el método ECF



(a) Muestras iniciales

De izquierda a derecha: licor de etapa D<sub>0</sub>, etapa E<sub>P</sub> y etapa D<sub>1</sub>.

Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)

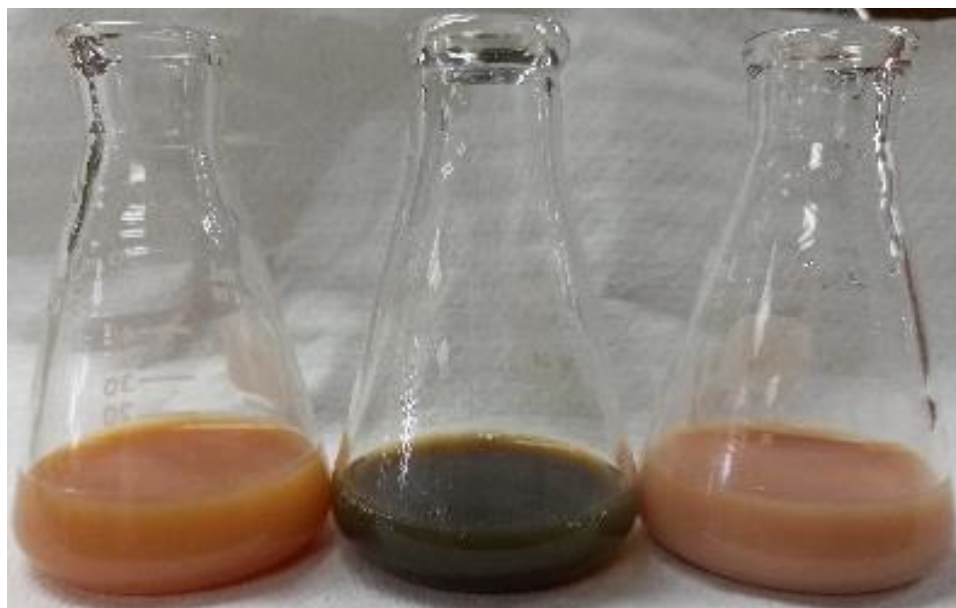


(b) Muestras con indicador cromato de potasio

De izquierda a derecha: licor de etapa D<sub>0</sub>, etapa E<sub>P</sub> y etapa D<sub>1</sub>.

Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)



(c) Muestras finales

De izquierda a derecha: licor de etapa D<sub>0</sub>, etapa E<sub>P</sub> y etapa D<sub>1</sub>.

Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)

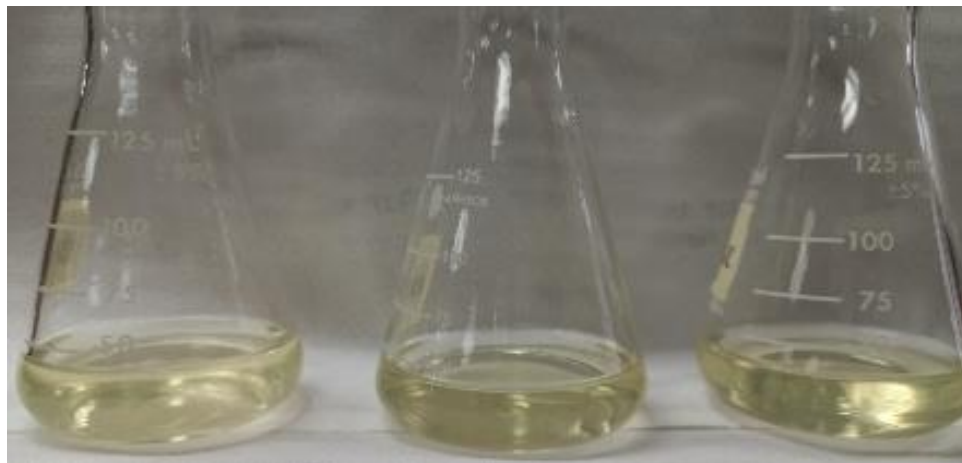
Figura 31. Calcinación de sulfatos del licor de pulpa blanqueada con el método TCF



Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)

Figura 32. Valoración de magnesio del licor de pulpa blanqueada con el método TCF

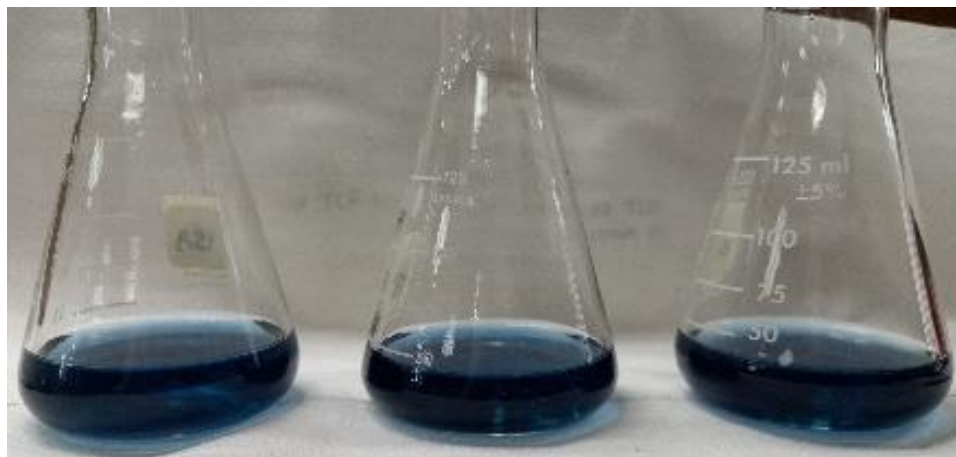


(a) Muestras sin indicador negro de eriocromo T

Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)





(b) Muestras con indicador negro de eriocromo T

Nota: proceso realizado a 24°C y 0.97 atm, en el laboratorio de química analítica de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)

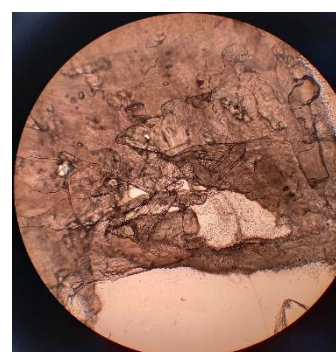
Figura 33. Fibras de pulpa blanqueada con el método ECF y TCF



(a) Original 8% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



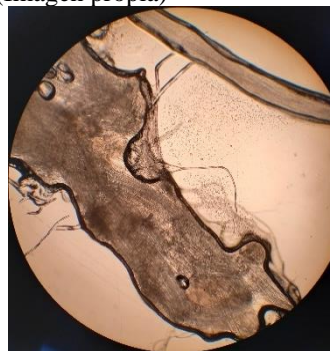
(b) ECF 8% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



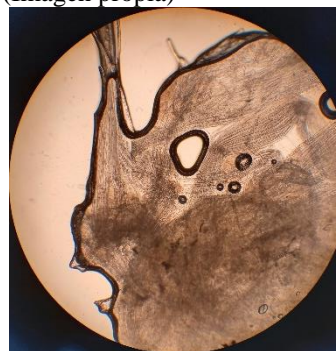
(c) TCF 8% NaOH 100 min  
(Imagen propia)



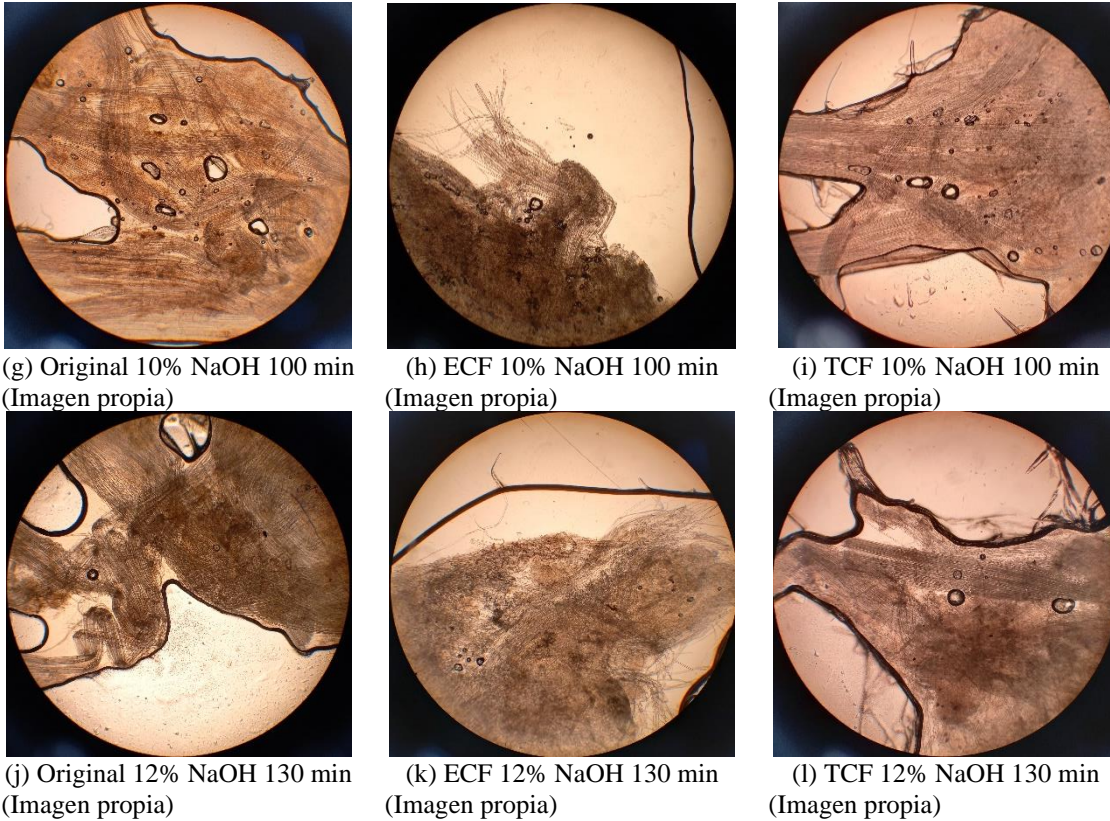
(d) Original 8% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



(e) ECF 8% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



(f) TCF 8% NaOH 150 min  
(Imagen propia)



Nota 1: mediciones efectuadas con un microscopio Fisher Scientific Micromaster.

Nota 2: concentración de NaOH expresada en m/m.

Nota 3: proceso realizado a 23°C y 0.97 atm, en el laboratorio de procesos biológicos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 34. Pinzote de banano empleado para el blanqueo ECF y TCF



Nota: fotografía tomada a 32°C y 0.99 atm en Escuintla, Guatemala.

(Imagen propia)

Figura 35. Pinzote de banano triturado



Nota: proceso realizado a 32°C y 0.99 atm en Escuintla, Guatemala.  
(Imagen propia)

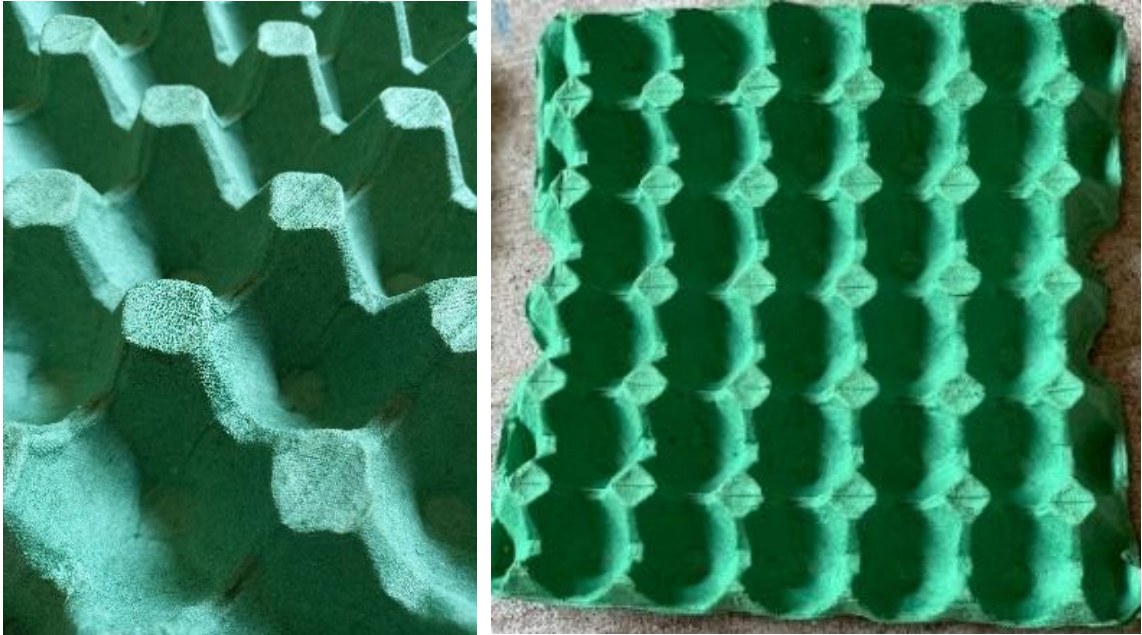
Figura 36. Torta de pinzote prensado con prensa hidráulica



Nota: proceso realizado a 25°C, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

(Imagen propia)

Figura 37. Cartón de huevos elaborado con pulpa deslignificada y blanqueada con el método ECF y TCF



(a) Frente del cartón de huevos

Nota: proceso realizado a 35°C y 0.99 atm en Escuintla, Guatemala.

(Imagen propia)



(b) Dorso del cartón de huevos

Nota: proceso realizado a 35°C y 0.99 atm en Escuintla, Guatemala.

(Imagen propia)

### XIII. GLOSARIO

- A. **CIELAB:** espacio de color que emplea coordenadas cromáticas de luminosidad, valor rojo/verde y valor amarillo/azul para determinar un color dentro del espacio.
- B. **CMYK:** Cyan, Magenta, Yellow, Black, por sus siglas en inglés. Modelo de color que combina el cian, magenta, amarillo y negro para crear colores.
- C. **ECF:** *Elemental Chlorine Free*, por sus siglas en inglés. Método de blanqueo libre de cloro elemental. Emplea dióxido de cloro, peróxidos y oxígeno como oxidantes en lugar del hipoclorito de sodio.
- D. **Lignina:** biopolímero abundante en las plantas. Conformar la pared celular junto con la celulosa y hemicelulosa. Se considera como un recurso renovable asequible y de potencial uso industrial.
- E. **Número Kappa:** número proporcional a la cantidad de lignina residual en la fibra, relacionado a la capacidad de blanqueo o grado de deslignificación de la pulpa.
- F. **Pantone®:** empresa norteamericana creadora del Sistema de Color Pantone®, que permite identificar colores, estandarizarlos y reproducirlos mediante un código determinado.
- G. **Pinzote:** también llamado raquis, es la fracción del tallo de la planta de banano que soporta el conjunto de bananos y está constituido por fibras lignocelulósicas.
- H. **RGB:** Red, Green, Blue, por sus siglas en inglés. Modelo de color aditivo que combina luz roja, verde y azul para crear colores.
- I. **TCF:** *Total Chlorine Free*, por sus siglas en inglés. Método de blanqueo totalmente libre de cloro. No emplea ninguna sustancia relacionada con átomos de cloro, sino quelantes, enzimas, ozono, peróxido de hidrógeno y perácidos.